



UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de génie Mécanique

# Comportement en fatigue d'un joint assemblé pour un châssis en aluminium sur un véhicule à 3 roues

Mémoire de maîtrise  
Spécialité : génie Mécanique

William Rougé

Jury:     Alain Desrochers (directeur)  
             Ahmed Maslouhi  
             Eric Menard

Sherbrooke (Québec) Canada

Août 2015



# RÉSUMÉ

Pour rester à la pointe de l'innovation, les constructeurs automobiles s'intéressent au développement de châssis allégés dans l'objectif de diminuer la consommation de carburant et d'améliorer la conduite. Les procédés d'assemblages représentent une part importante du coût d'un châssis et les joints sont les zones les plus critiques d'un assemblage. Cette maîtrise s'intéresse à la problématique du soudage dans le cadre de l'utilisation d'alliage d'aluminium pour des structures soumis à des sollicitations de fatigue.

Ce travail est axé autour d'une méthodologie mise en place pour l'étude d'un joint générique provenant d'un châssis de véhicule automobile.

Nous avons tout d'abord cherché à obtenir la courbe contrainte-déformation précise de l'aluminium 6061T6 utilisé pour le châssis par des essais de traction sur éprouvettes. Des essais de traction et de dureté ont également été réalisés afin de déterminer l'impact d'un cordon de soudure sur la tenue mécanique de l'assemblage.

Nous avons ensuite étudié un joint particulier du joint. La méthodologie a été d'abord appliquée à un joint en acier afin de valider la démarche. Un gabarit a été conçu afin de reproduire le chargement réel subit par le joint ainsi qu'un modèle numérique de cet ensemble pour déterminer les valeurs de vérin appliqués par les vérins du banc d'essai de fatigue. Cet essai a permis de valider la démarche qui a ensuite été appliquée au joint en aluminium.

Cet essai a permis de valider la géométrie et le procédé d'assemblage utilisé pour le châssis en aluminium.

**Mots-clés :** Assemblage soudé, assemblage, châssis, test de fatigue, éléments finis, joint soudé, expérimentation

# REMERCIEMENTS

Un projet de maîtrise est une longue aventure qui ne peut être achevée sans la confiance, l'aide et le soutien de nombreuses personnes.

Aussi, je tiens à remercier les professeurs et professionnels qui m'ont encadré afin de mener à bien ce projet : mon directeur de projet, Alain DESROCHERS, pour la confiance qu'il m'a accordée, Patrick QUIRION, dont les remarques pertinentes et la connaissance du projet ont permis d'orienter les recherches et enfin Ahmed MASLOUHI dont les expertises se sont révélées très utiles à mon projet.

Par ailleurs, je souhaite remercier l'ensemble de l'équipe structure du projet APC : Yann MOGENOT et Cristian IORGA pour leur apport au projet et l'aide qu'ils m'ont fourni.

J'aimerais aussi remercier les personnes que j'ai pu côtoyer dans les ateliers du CTA pour leur disponibilité et pour avoir partagé avec moi leurs connaissances techniques : Jérôme, Patrick, Marc et Jean-Charles.

En dehors du laboratoire, plusieurs personnes m'ont toujours encouragé, soutenu et permis de passer un agréable séjour au Québec, je pense à Thomas, Caroline et mes colocataires.

Finalement, j'aimerais remercier mes parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé tout au long de mes études. Malgré la distance qui allait nous séparer, ils ont toujours approuvé mes choix et c'est grâce à eux que j'ai pu vivre cette expérience enrichissante.



# TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ .....	ii
REMERCIEMENTS .....	iii
LISTE DES FIGURES .....	vii
LISTE DES TABLEAUX .....	xi
CHAPITRE 1. Introduction .....	1
1.1 Mise en contexte .....	1
1.2 Étapes pour la conception d'un châssis .....	3
1.3 Problématique .....	4
1.4 Objectifs .....	5
1.4.1 Objectif principal .....	6
1.4.2 Objectifs secondaires .....	6
1.5 Plan du document .....	7
1.6 Contribution originale .....	7
CHAPITRE 2. État de l'art .....	9
2.1. Matériaux dans le domaine des transports .....	9
2.1.1 Alliage léger .....	10
2.1.2 Alliage d'aluminium .....	11
2.2. Les différents procédés d'assemblage .....	12
2.2.1 Rivetage .....	15
2.2.2 Assemblage boulonné .....	17
2.2.3 Le Soudage .....	19
2.3. Critères de conception général .....	21
2.4. Critères de conception imposés .....	21
2.5. Validation des critères : Méthodes mises en place .....	23
2.6. Étude de la fatigue .....	24

2.6.1	Énoncés généraux sur les alliages d'aluminium et d'acier .....	28
2.6.1	Énoncés généraux sur les soudures et leur endommagement en fatigue.....	29
2.6.2	Méthodologie d'étude des cordons de soudure .....	31
2.7.	Outils d'étude pour valider un joint.....	35
2.7.1	Analyse numérique.....	35
2.7.2	Étude expérimentale.....	38
CHAPITRE 3.	Méthodologie .....	41
3.1.	Stratégie générale .....	41
3.2.	Alliages utilisés dans le contexte de validation de la géométrie du joint .....	44
3.3.	Méthodologie pour choix des procédés d'assemblage .....	46
3.4.	Méthodologie d'étude des joints et modélisation numérique .....	47
CHAPITRE 4.	Application au châssis du Roadster .....	53
4.1.	Présentation de l'évolution de la géométrie du châssis .....	53
4.2.	Choix du procédé d'assemblage .....	55
4.3.	Étude éprouvette .....	55
4.3.1.	Éprouvette en métal de base.....	56
4.3.2.	Éprouvette soudée .....	59
4.3.3.	Essai de dureté.....	65
4.4.	Étude des joints.....	71
4.4.1.	Essai de fatigue sur le joint en acier .....	73
4.4.2.	Étude du joint en aluminium .....	87
4.5.	Étude du cintrage d'un profilé rectangulaire 6061T6.....	98
4.6.	Calcul des contraintes par la méthode des éléments finis .....	106
CHAPITRE 5.	Conclusion .....	117
5.1	Travaux réalisés et bilan de la maîtrise .....	117
5.2	Perspectives et travaux futurs .....	118
LISTE DES RÉFÉRENCES	.....	120



# LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Prototype de Roadster hybride à trois roues .....	1
Figure 1.2: Distribution du poids pour une voiture Mercedes-Benz classe C (4) .....	2
Figure 1.3: Masse du véhicule vs. Énergie consommée (2) .....	3
Figure 2.1 : Composition d'un airbus A350 (12) .....	10
Figure 2.2: Séquence de traitement de durcissement structural d'alliages d'aluminium (16) ..	12
Figure 2.3:Présentation des différents procédés d'assemblage (18) .....	13
Figure 2.4 : Critères de sélection d'un procédé d'assemblage .....	14
Figure 2.5 : Concentration de contrainte au niveau du trou du rivet .....	15
Figure 2.6 : Courbe de fatigue pour un assemblage riveté (22) .....	16
Figure 2.7 : Application d'un couple de précharge .....	18
Figure 2.8: Châssis Roadster 2009 .....	22
Figure 2.9: Courbe de Wöhler (26) .....	26
Figure 2.10: Courbe S/N pour 6061T6 (26) .....	27
Figure 2.11: Description d'un cordon de soudure ( <a href="http://poste-a-souder.comprendrechoisir.com/comprendre/soudure-aluminium">http://poste-a-souder.comprendrechoisir.com/comprendre/soudure-aluminium</a> ).....	30
Figure 2.12:Distribution de contraintes au niveau du pied de soudure (28).....	34
Figure 2.13: Démarche de développement et d'application de la méthodologie pour une étude par élément fini (36) .....	36
Figure 2.14: Modélisation sous Ansys de la version soudée (7) .....	37
Figure 2.15: Gabarit du châssis Roadster .....	39
Figure 2.16: Exemple de Gabarit pour le joint arrière du châssis Roadster .....	40
Figure 3.1: Méthodologie de validation de châssis (26).....	42
Figure 3.2: Schéma de la méthodologie d'étude d'un joint assemblé .....	44
Figure 3.3 : Caractéristiques mécaniques des différents alliages .....	45
Figure 3.4 : Rayon de pliage en fonction de l'épaisseur (e) .....	45
Figure 3.5:Présentation de la zone étudiée sur le concept 9 du châssis en aluminium .....	46
Figure 3.6 : Méthodologie de choix de procédé d'assemblage (1).....	47
Figure 3.7: Méthodologie en pyramide .....	49

Figure 4.1: Présentation des différentes géométries du châssis, de haut en bas de gauche à droite, châssis Roadster 2009 (acier), version en aluminium développé par Mogenot, version aluminium développé par Iorga, dernière version actuelle .....	54
Figure 4.2: Machine de traction statique .....	56
Figure 4.3: Dimensions de l'éprouvette haltère utilisée dans l'essai de traction .....	57
Figure 4.4: Loi de comportement statique du 6061T6 .....	57
Figure 4.5 : Dispositif expérimental.....	60
Figure 4.6: Chargement du joint .....	61
Figure 4.7: Éprouvette soudée de traction.....	61
Figure 4.8 : Cordon de soudure.....	62
Figure 4.9: Loi de comportement des joints soudés.....	63
Figure 4.10: Baisse des caractéristiques mécaniques des éprouvettes soudées .....	65
Figure 4.11 : Cordon de soudure, épaisseur 6 mm.....	67
Figure 4.12: Dureté en début de cordon .....	67
Figure 4.13: Dureté en milieu de cordon.....	68
Figure 4.14: Dureté en fin de cordon .....	68
Figure 4.15: étendue des mesures de dureté.....	69
Figure 4.16: écart type des mesures de dureté .....	69
Figure 4.17: Étendue des différentes zones autour d'un cordon de soudure.....	70
Figure 4.18 : Différentes zones du métal (40).....	71
Figure 4.19: Jauges de déformations en rosette .....	72
Figure 4.20 : Présentation du joint étudié .....	73
Figure 4.21: Présentation du gabarit .....	74
Figure 4.22: Distribution des contraintes sur le châssis entier .....	75
Figure 4.23: Détermination des cas de chargement .....	76
Figure 4.24 : Distribution des contraintes au niveau du joint arrière, en haut flexion et en bas torsion.....	77
Figure 4.25: Distribution de contrainte dans un point éloigné du joint.....	78
Figure 4.26: Distribution de contrainte au niveau du joint .....	79
Figure 4.27: Erreur absolue sur la valeur de contrainte .....	81
Figure 4.28: Dispositif expérimental.....	81

Figure 4.29: Position de la jauge sur la poutre installée sur le gabarit (vue de dessus) .....	83
Figure 4.30: Courbe de déformation obtenue à partir d'une jauge sous un chargement de torsion (en ordonnée les micro déformations, en abscisse le temps en seconde).....	84
Figure 4.31: Courbe de déformation obtenue à partir d'une jauge sous un chargement de flexion (en ordonnée les déformations, en abscisse le temps en seconde) .....	85
Figure 4.32: Dommage cumulé au niveau des points P1 et P2 .....	86
Figure 4.33: Géométrie du joint version 1 .....	88
Figure 4.34: Présentation du joint arrière installé sur le gabarit.....	88
Figure 4.35: Distribution de contraintes sous un chargement de flexion à gauche, distribution de déplacements sous un chargement en flexion à droite.....	89
Figure 4.36: Erreur de déplacement .....	90
Figure 4.37: Dispositif expérimental .....	91
Figure 4.38: Localisation des fissures .....	92
Figure 4.39: Fissure au niveau du cordon de soudure .....	92
Figure 4.40: Fissure au niveau du cordon de soudure .....	93
Figure 4.41 : Distribution de contraintes au niveau des zones d'amorce de fissure .....	95
Figure 4.42: Châssis en aluminium .....	99
Figure 4.43: Poutre pliée au rayon de 190 mm.....	99
Figure 4.44: Présentation du gabarit pour l'essai de fatigue et dispositif expérimental.....	101
Figure 4.45 : Emplacement des jauges de déformation.....	101
Figure 4.46: Distribution de contrainte sous un chargement en freinage .....	101
Figure 4.47: Comparaison de la distribution de contraintes .....	102
Figure 4.48: Erreurs entre valeurs expérimentales et numériques .....	103
Figure 4.49: Données fournies par la jauge 2 sous un chargement en torsion .....	104
Figure 4.50: Observation au microscope d'une égratignure sur la poutre cintrée (X12) .....	105
Figure 4.51 : Dommage au niveau du point 2 .....	106
Figure 4.52: Dommage au niveau du point 1 .....	106
Figure 4.53: Exemple de modélisation d'un joint soudé.....	107
Figure 4.54: Exemple de coupe d'un cordon de soudure (43) .....	108
Figure 4.55: Modèle CAO du cordon de soudure .....	109

Figure 4.56: En haut, modèle avec courbe expérimentale, en bas sans. De gauche à droite, distribution de contrainte équivalente, déformation élastique, déformation plastique .....	110
Figure 4.57: Modèle avec cordon de soudure monté sur le gabarit .....	111
Figure 4.58: Distribution de contraintes sous un chargement de flexion, distribution de contraintes au niveau d'un cordon de soudure .....	112
Figure 4.59: Distribution de la contrainte au niveau du pied de cordon de soudure.....	113
Figure 4.60: Contrainte au niveau de la surface du cordon de soudure .....	114
Figure 4.61: Distribution de contraintes sous un chargement de flexion à gauche, distribution de contrainte au niveau de la zone de rupture à droite .....	115

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1: Caractéristiques de l'alliage 6061T6 .....	58
Tableau 4.2:Caractéristiques mécaniques de la soudure (valeur moyenne sur les 6 éprouvettes) .....	64
Tableau 4.3 : Écart type et étendu des mesures effectuées sur les éprouvettes .....	64
Tableau 4.4 : Mesures de dureté pour une épaisseur de 6 mm .....	70
Tableau 4.5: Spectre de chargement.....	76
Tableau 4.6: Valeur des contraintes selon différents points de mesure (figure 4.24) dans le cas d'un chargement en virage .....	80
Tableau 4.7: Valeur des contraintes selon différents points de mesure dans le cas d'un chargement en freinage.....	80
Tableau 4.8: Exemple de spectre pour l'essai d'étude du joint .....	82
Tableau 4.9: Validation des essais à l'aide du déplacement sous la charge moyenne Flexion..	89
Tableau 4.10: Validation des essais à l'aide du déplacement sous la charge moyenne Torsion/flexion .....	90
Tableau 4.11 : Qualité du maillage.....	94
Tableau 4.12 : Contrainte au point A .....	94
Tableau 4.13: Valeurs des contraintes selon différents points de mesure dans le cas d'un chargement en freinage.....	102
Tableau 4.14: Valeur des contraintes selon différents points de mesure dans le cas d'un chargement en virage.....	103
Tableau 4.15 : Qualité du maillage et contrainte De Von-Mises au point B.....	115



# CHAPITRE 1. Introduction

## 1.1 Mise en contexte

Les questions écologiques prennent de plus en plus de poids dans la société moderne. La société prend conscience de ses problématiques écologiques et une envie de consommer plus vert se développe. Or le secteur du transport est responsable de 32% des rejets de CO<sub>2</sub> en Europe (1). Ceci, additionné au prix de plus en plus élevé du carburant et à la politique des gouvernements de nombreux pays à valoriser les véhicules à moindre consommation, a permis le développement de véhicules hybrides, voire tout électrique, par les différents constructeurs automobiles. Le Partenariat Automobile Canada (PAC), un programme créé pour relancer l'industrie automobile canadienne, finance un projet d'hybridation et le développement d'un véhicule tout électrique (Figure 1.1). Ce projet comprend une étude thermique, aérodynamique, électrique et structurelle afin de modifier un roadster classique thermique en un véhicule hybride ou électrique. L'objectif est de concevoir un véhicule qui consomme moins de carburant et respecte les dernières normes de rejet de particules inscrites dans le règlement sur les émissions des véhicules routiers et de leurs moteurs (2).



Figure 1.1 : Prototypé de Roadster hybride à trois roues

Plusieurs études (3) (4) permettent de relier directement la consommation de carburant et l'émission de gaz CO<sub>2</sub> au poids du véhicule. Il convient d'observer les différentes composantes de la masse d'un véhicule; une étude réalisée sur une voiture Mercedes-Benz montre la répartition de la masse sur un véhicule automobile (Figure 1.2) (5). On constate que le châssis représente une part importante de la masse totale. De plus, la masse du véhicule affecte de

nombreux autres paramètres tels que la traînée, l'inertie qui ont un impact sur la consommation, figure 1.3. De plus, une diminution du poids total du véhicule de 50 Kg entraîne une diminution de la consommation de carburant du véhicule de 3 à 4%. Le châssis représente 11.8% du poids total, pilote compris. L'objectif global du projet est de diminuer la masse du châssis afin de participer à la réduction de la consommation de carburant. Dans le cas particulier du véhicule hybride, la diminution du poids du châssis va permettre de compenser une partie de l'augmentation du poids total du véhicule due à l'ajout de certains composants tels que le bloc-batterie et le moteur électrique.

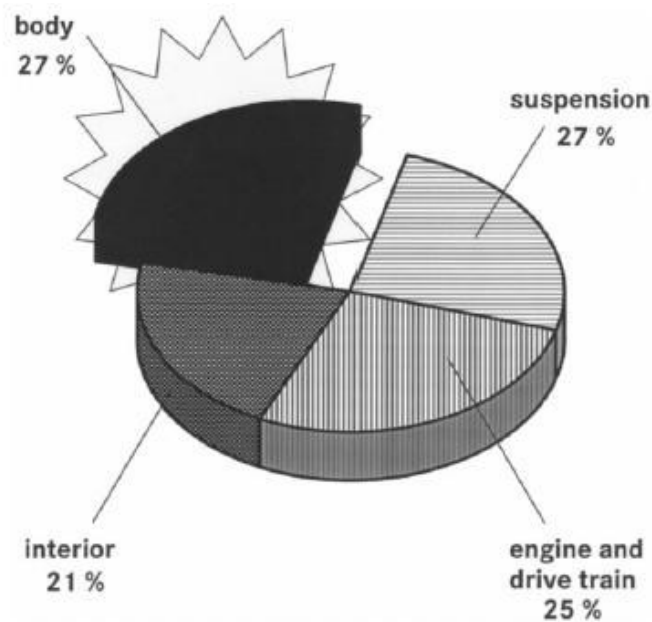


Figure 1.2: Distribution du poids pour une voiture Mercedes-Benz classe C (4)



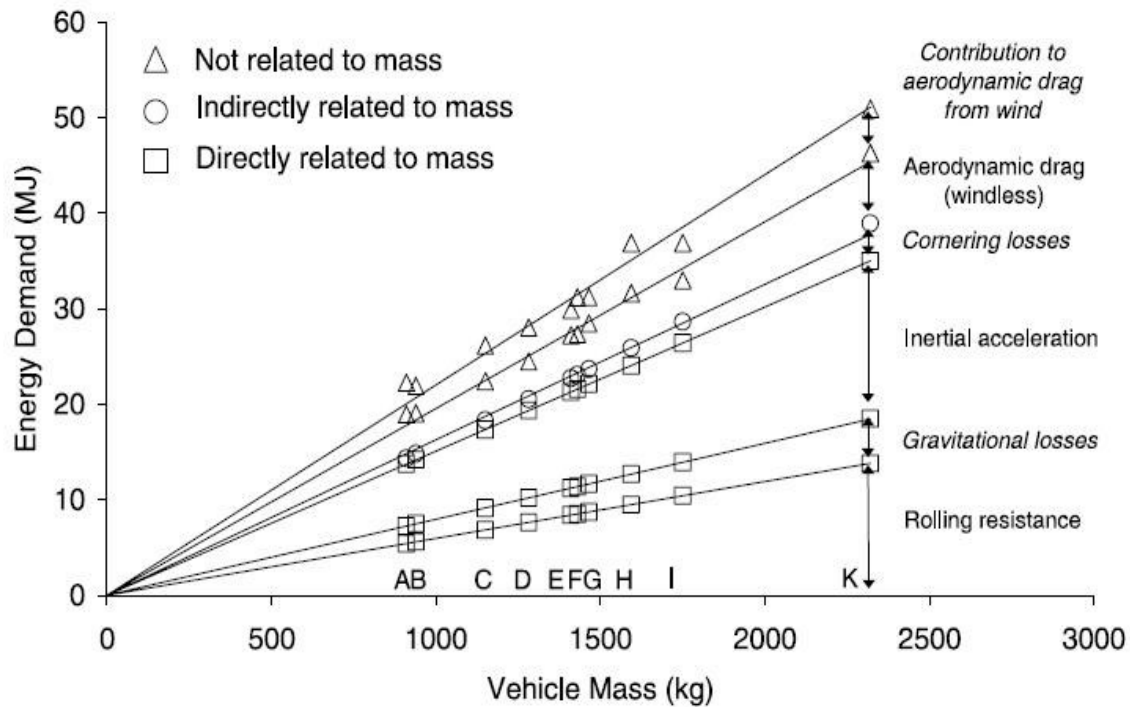


Figure 1.3: Masse du véhicule vs. Énergie consommée (2)

## 1.2 Étapes pour la conception d'un châssis

Il n'existe pas de solution universelle pour concevoir un châssis, il est important de procéder par étape. La conception d'un châssis nécessite de respecter un certain nombre d'étapes. Selon (6) (7) la conception d'un objet pour une application donnée comporte quatre aspects essentiels :

- La fonction (contrainte et optimisation),
- Le choix de matériaux ;
- Le choix du procédé ;
- La définition de la forme et des cotes précises de l'objet.

Plusieurs entreprises utilisent une méthodologie de conception basée sur un système dit « Stage-Gate », constituée de plusieurs étapes à valider avant de passer à la suivante.

On peut compter de 4 à 7 étapes, selon les entreprises. L'information est plus précise à chaque étape de l'étude. L'idée d'un nouveau produit se trouve à l'étape 0. Les étapes 1 et 2 correspondent à l'étude de faisabilité du produit. Les étapes 3 et 4 correspondent au développement à proprement parler du produit. Le projet est donné au bureau d'ingénierie pour ces étapes. Les ingénieurs vont se baser sur le cahier des charges pour proposer un concept et créer un prototype basé sur le concept qui pourra par la suite être validé pour les différentes

caractéristiques recherchées. Avant d'arriver à la fabrication du prototype, il faut travailler sur la fiabilité des différentes pièces avec divers tests tels que des analyses numériques et des essais expérimentaux (8). L'étape 5 correspond à la validation de la chaîne de production en vue d'une production en série

Dans certains projets il est nécessaire d'ajouter une étape supplémentaire à ce processus pour caractériser correctement le produit. Cette étape supplémentaire concerne des tests en fatigue. Les véhicules sont testés habituellement avec des charges statiques critiques provenant des situations de vie du véhicule.

Dans le cas particulier du châssis du Roadster, les étapes de conception suivantes ont été mises en œuvre :

- Choix d'une géométrie pour le châssis;
- Choix d'un matériau ;
- Validation en statique et en fatigue du châssis;
- Optimisation de la géométrie;
- Choix d'un procédé d'assemblage;
- Étude en statique et en fatigue des joints;
- Optimisation de la géométrie globale en prenant en compte l'impact des joints.

Plusieurs étapes du projet ont été réalisées par les différents membres qui ont participé au projet.

### 1.3 Problématique

L'objectif du projet dont fait partie cette étude est de concevoir et d'optimiser la structure du Roadster. La conception du produit doit suivre le cahier des charges donné par le fabricant. Le travail d'allègement du châssis a été réalisé à l'aide d'une amélioration du design ainsi que grâce au choix d'un matériau plus léger. Le nouveau design du châssis du Roadster a permis une diminution conséquente du poids. Le choix d'un nouveau matériau pour le châssis ainsi que la modification de la géométrie ont modifié ses caractéristiques mécaniques et sa tenue mécanique,

le but de cette étude est donc de valider en statique et en fatigue un joint du nouveau châssis en aluminium.

Les zones d'assemblage sont les zones les plus critiques d'un châssis, elles nécessitent une étude approfondie. Cependant on remarque qu'il y a peu d'études portant sur l'étude détaillée en fatigue de joints. Le but final est de valider les géométries des joints existants du châssis dans le cas de chargements en statique et en fatigue et, le cas échéant, optimiser la géométrie pour vérifier le cahier des charges. Le point de départ de l'étude est le châssis en aluminium optimisé avec des joints rivetés ou soudés selon les zones du châssis. La difficulté principale réside dans le fait que les analyses par éléments finis ne fournissent pas de renseignements sur les zones aux alentours des joints. La validation des joints ne pourra être réalisée qu'à l'aide de méthodes expérimentales.

Une deuxième difficulté réside dans le fait que le châssis doit conserver une rigidité minimale afin de ne pas nuire à la sensation de conduite du pilote. La conception et l'optimisation des joints ne devront pas baisser la rigidité de l'ensemble. De plus, certaines modifications seront peut-être apportées au châssis existant, pour modifier sa rigidité ; ces modifications pourront modifier la répartition des contraintes dans le châssis.

Les châssis typiques utilisés sur les véhicules récréatifs comme le Roadster contiennent des soudures dont la géométrie diffère grandement de celles trouvées dans les guides de conception (9) (10). De ce fait, la méthode SN utilisée habituellement est difficilement applicable au problème de fatigue sur ce type de véhicule. La complexité des structures monocoques et tubulaires retrouvées dans les châssis de véhicule récréatif rend l'utilisation de méthodes analytiques difficile et donc la réalisation d'un calcul à la main impossible malgré la puissance de ces méthodes tirées de la mécanique des milieux continus.

## 1.4 Objectifs

L'objectif global est de développer un nouveau châssis pour le Roadster avec un poids inférieur au précédents châssis. La validation des zones d'assemblages permettra de finaliser le

projet et de proposer un châssis répondant au cahier des charges. Au cours de cette maîtrise plusieurs objectifs devront être atteints.

### 1.4.1 Objectif principal

L'objectif principal de ce mémoire est de sélectionner un procédé d'assemblage adéquat pour le châssis et de valider la tenue mécanique en statique et en fatigue de ce procédé par l'étude d'un joint issu du châssis du Roadster.

### 1.4.2 Objectifs secondaires

Pour satisfaire l'objectif principal, la réalisation d'objectifs secondaires est nécessaire.

Le premier objectif est l'identification des procédés d'assemblage candidats pouvant être mis en œuvre pour le châssis du Roadster ainsi que leurs caractéristiques. Trois procédés d'assemblage ont été identifiés comme prometteurs : le soudage, le rivetage et le collage. La réalisation de cet objectif permet la sélection d'un procédé d'assemblage qui sera utilisé pour le châssis.

Le second objectif est l'étude des impacts du procédé d'assemblage sur la tenue mécanique du châssis. Certains procédés d'assemblages impact fortement les caractéristiques mécaniques de la structure, il est donc nécessaire d'évaluer ces impacts à l'aide d'essais expérimentaux.

Le troisième objectif est l'étude en statique et en fatigue d'un joint semblable à ceux du châssis à l'aide de modèles numériques et d'essais expérimentaux. Cette étude mène à la validation du choix du procédé d'assemblage en termes de tenue mécanique.

Un quatrième objectif a été rajouté au cours du projet, la validation de la tenue mécanique en fatigue d'une poutre 4\*2 en 6061T6 cintré. Ce matériau est reconnu pour présenter des difficultés au cintrage, il est donc nécessaire de vérifier l'intégrité de la poutre au rayon de cintrage souhaité.

---

Un objectif dans le long terme est la validation en fatigue du châssis en aluminium en entier en suivant une méthodologie de validation.

## 1.5 Plan du document

Ce document est composé de trois parties principales afin de répondre aux objectifs énoncés ci-dessus. La première partie, l'état de l'art, donne une synthèse des connaissances sur les procédés d'assemblages et sur l'étude en fatigue d'une structure mécanique via des moyens théoriques et expérimentaux. Cette partie correspond au chapitre 2 de ce document.

La seconde partie propose des méthodologies afin de répondre aux problèmes posés. Cette partie présente 3 méthodologies employées dans ce projet développé par C. Iorga, Y. Mogenot et par moi-même. Ces méthodologies concernent la stratégie générale de validation d'un châssis (C. Iorga, W. Rougé), l'étude et la sélection d'un procédé d'assemblage et d'un matériau (Y. Mogenot) et enfin l'étude des joints et leur modélisation numérique (W. Rougé). Cette partie est développée dans le chapitre 3 de ce document.

La troisième partie propose la mise en application de la méthodologie d'étude des joints à un joint générique inspiré du châssis du Roadster. Cette partie comporte l'étude en traction d'éprouvettes, étude en fatigue d'un joint ainsi que la modélisation numérique et l'étude par éléments finis de ce joint. Cette partie correspond au chapitre 4 de ce document.

Le chapitre 5 présente le bilan de cette maîtrise et les perspectives futures du projet souhaitable.

## 1.6 Contribution originale

Cette maîtrise présente la méthodologie et l'étude d'un joint soudé en aluminium qui sont au cœur de la plupart des problèmes de structure en aluminium. La soudure des alliages d'aluminium est beaucoup moins documentée et maîtrisée que ceux des alliages d'aciers qui ont profité de programme de test et d'essai dans les années 1970.

Cette maitrise apporte une contribution originale par le développement d'une méthodologie d'étude des joints soudée sur une structure aluminium applicable à des types de joint pouvant être retrouvés sur un châssis de roadster et son application à un cas concret de joint.

## CHAPITRE 2. État de l'art

### 2.1. Matériaux dans le domaine des transports

Les premières versions du châssis du Roadster à motorisation thermique, hybride et électrique sont fabriquées à partir d'un acier à haute résistance, faiblement allié. Aujourd'hui on constate que l'industrie automobile s'intéresse de plus en plus à différents matériaux autre que l'acier afin de trouver un rapport masse/caractéristique mécanique plus intéressant. Le domaine aéronautique a pris une certaine avance au niveau métallurgique ; les matériaux comme l'aluminium, le magnésium, le titane ou encore les composites (fibres de carbone, de verre, matrice aluminium) sont utilisés depuis des dizaines d'années (figure 2.1). La problématique de réduction de poids est à l'ordre du jour depuis de nombreuses années ; la nécessité d'avoir des structures plus légères est devenue une priorité. Une des solutions développées, en combinaison avec d'autres, ces dernières années pour réduire le poids, est le changement d'un matériau comme décrit dans l'article suivant (11). Les constructeurs automobile, avec l'augmentation du prix du carburant, les considérations écologiques de plus en plus fortes et pour augmenter les performances des véhicules, étudient la conception de châssis en acier haute performance, en aluminium ou en composite (5). Par exemple, Mazda a réduit le poids du châssis de la Mazda 2 pour permettre une meilleure dynamique de conduite à l'aide du choix d'un nouveau matériau et l'application d'une nouvelle méthode de développement permettant de réaliser un châssis plus résistant et plus léger.

Les précédentes versions du châssis du Roadster ont été développées avec un acier à haute résistance mécanique. Les propriétés mécaniques de cet alliage sont excellentes, cependant ce choix implique une masse importante pour le châssis.

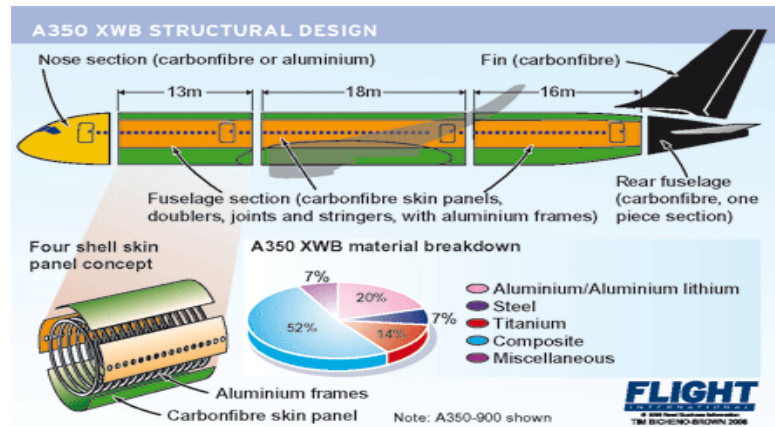


Figure 2.1 : Composition d'un airbus A350 (12)

### 2.1.1 Alliage léger

Ces dernières années, dans le milieu de l'automobile, deux philosophies se sont opposées pour la construction de châssis plus légers ; l'utilisation d'aciers à haute résistance ou d'alliage d'aluminium. Ce choix dépend de faits historiques de l'entreprise et des compétences présentes au sein de l'entreprise. Certaines entreprises s'intéressent aux alliages d'aluminium depuis de nombreuses années tel qu'Audi. (13)

Les alliages légers ont l'avantage de présenter de bonnes caractéristiques en termes de rapport masse volumique/caractéristique mécanique. Les alliages légers utilisés dans le domaine automobile sont élaborés à partir d'aluminium, de titane et pour les ultralégers à partir de magnésium. Un traitement thermique permet d'obtenir des alliages bénéficiant d'une excellente résistance mécanique pour un faible poids. Actuellement, une voiture contient environ 150 kg d'aluminium réparti dans la structure et de plus en plus dans des pièces telles que les carter, les blocs moteurs, les radiateurs, les jantes, la carrosserie. (14)

Les aciers à haute résistance mécanique présentent une haute résistance mécanique (limite élastique de 210 MPa à 550 Mpa) et une très bonne formabilité. Ces matériaux ont permis à plusieurs constructeurs de réduire le poids et le coût de fabrication de leurs véhicules.



### 2.1.2 Alliage d'aluminium

Les alliages d'aluminium sont principalement utilisés dans l'industrie aéronautique. Ils constituent environ 70% des matériaux utilisés pour la fabrication des avions civils. L'aluminium peut être utilisé à différents degrés de pureté ou sous forme d'alliage, avec la plupart des métaux (cuivre, manganèse, magnésium, silicium, zinc, etc.). Son utilisation est de plus en plus courante : Jaguar, Lotus. (15)

Les alliages d'aluminium présentent un large spectre de caractéristiques mécaniques dépendant de leur série. Par exemple, la résistance à la rupture va de 50 MPa, pour l'aluminium raffiné à l'état recuit, à 750 MPa, pour les alliages à haute résistance du type Al-Zn-Mg-Cu à l'état trempé revenu.

Les caractéristiques importantes nécessaires pour le châssis du Roadster sont la résistance mécanique, la résistance à la fatigue, la rigidité et le rayon de pliage pour les actions de fabrication. L'utilisation de l'aluminium demande certaines précautions par rapport à de l'acier ; en effet le soudage de l'aluminium se relève plus contraignant que celui de l'acier ce qui justifie l'importance de l'étude des joints.

Le soudage des alliages d'aluminium peut entraîner des pertes de caractéristiques mécaniques dues à l'apport de chaleur élevé. Un traitement thermique sera éventuellement nécessaire pour rétablir les caractéristiques mécaniques.

Les traitements thermiques influencent aussi un grand nombre de propriétés qui ont un rôle important sur le comportement de l'alliage :

- L'aptitude à la transformation à chaud ;
- La résistance à la corrosion, à la fatigue, au fluage ;
- La conductivité électrique ;
- La stabilité dimensionnelle.

Le durcissement structural, qui joue un rôle important sur les caractéristiques mécaniques, est obtenu par une séquence de traitements thermiques. La figure suivante (figure 2.2) présente un exemple d'enchaînement de séquences. Chaque cas nécessite une étude particulière pour

déterminer les températures et les temps de chaque palier. Ces paramètres dépendent du type d'alliage, de la masse et de la géométrie des pièces à traiter.

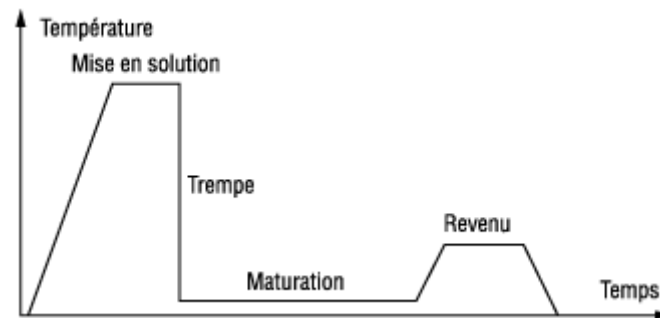


Figure 2.2: Séquence de traitement de durcissement structural d'alliages d'aluminium (16)

### **La mise en solution**

La première étape consiste à dissoudre les éléments d'alliage qui se trouvent en phases séparées dans le métal de base à haute température.

### **La trempe**

La première étape est suivie d'une trempe. La structure du métal évolue vers une structure stable à température ambiante. La dureté de l'alliage augmente.

### **La maturation**

Après la trempe, les alliages durcissent par un séjour à température ambiante. La plasticité de l'alliage diminue au fur et à mesure que sa dureté augmente. Cette opération est appelée maturation ou vieillissement naturel.

### **Le revenu**

Le revenu, ou vieillissement artificiel, est un traitement à température supérieure à celle ambiante qui confère une structure différente de celle de la maturation et qui conduit à des caractéristiques supérieures, en particulier pour la limite élastique.

L'ensemble de ces opérations peut prendre de quelques jours à plusieurs semaines.

## **2.2. Les différents procédés d'assemblage**

Un assemblage mécanique est l'association de différentes pièces d'un ensemble ou produit liées entre elles, figure 7. Il est caractérisé par l'absence de mouvement relatif entre les pièces assemblées. Les solutions sont multiples et chacune d'entre elles possède des avantages et des

inconvenients. Le choix d'un procédé est un élément primordial de la conception de la structure. Il a été démontré dans plusieurs études (17) (18), que les zones les plus sensibles d'une structure sont les liaisons mécaniques. De plus, les procédés d'assemblage représentent une part importante du coût d'un châssis. Les procédés d'assemblage peuvent compter jusqu'à 2/3 des coûts de fabrication (19).

De nombreuses recherches portent encore sur les moyens d'assemblage et leurs procédés. Les entreprises consacrent du temps et de l'argent pour optimiser ce point. Seuls les procédés confirmés et au point peuvent être utilisés dans une industrie aussi pointue et compétitive que celle du transport. Le logiciel *CES Edupack 2011* recense 53 procédés différents dans sa base de données. Il y a différentes méthodes de classification des différents procédés de fabrication. Les différents procédés d'assemblage peuvent être rangés en trois grandes familles : le collage, le soudage et les pièces de fixation mécanique (figure 2.3).

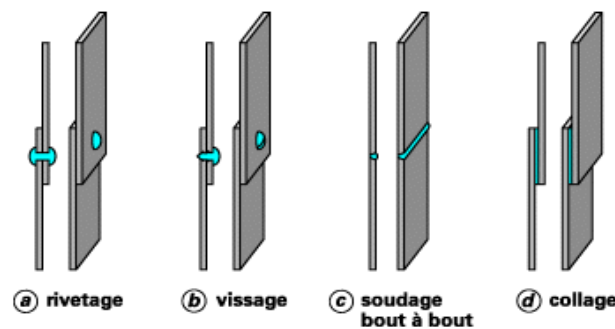


Figure 2.3:Présentation des différents procédés d'assemblage (18)

L'assemblage est une étape essentielle du procédé de fabrication d'un châssis pour plusieurs raisons :

- Influence la qualité géométrique de la pièce;
- Représente une part importante du cout de fabrication;
- Dépend pour certains procédé à l'habilité manuel de l'opérateur;
- Peut affaiblir la structure.

Afin de choisir le procédé d'assemblage le plus adapté à chaque situation, il est nécessaire de définir les principaux critères de sélection, figure 2.4.

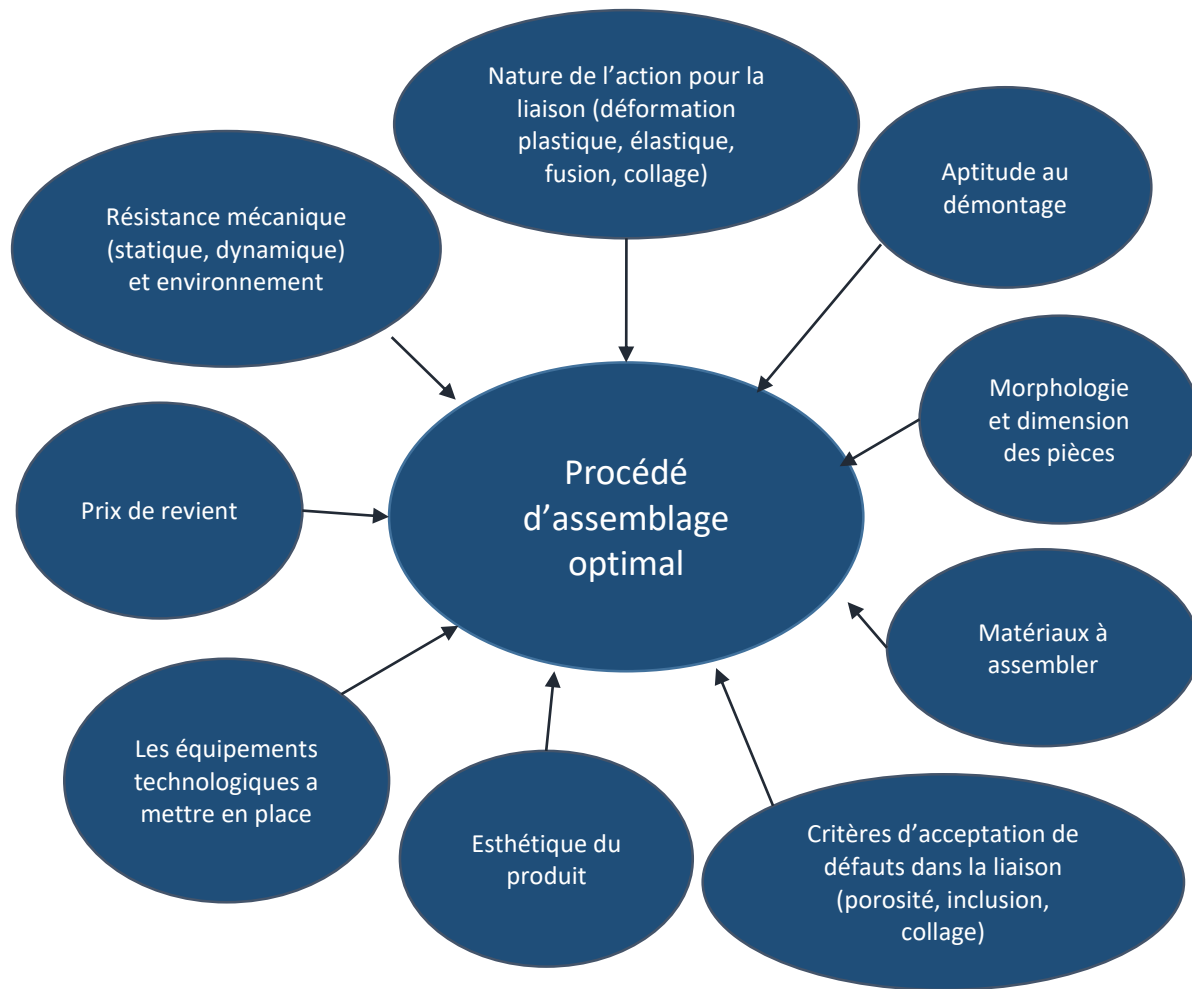


Figure 2.4 : Critères de sélection d'un procédé d'assemblage

Chaque procédé d'assemblage possède ses avantages et ses inconvénients. La section suivante va présenter pour les 3 principaux procédés d'assemblage utilisés dans la construction métallique (rivetage, boulonnage, soudage) les principaux critères. Cette section a pour objectif de fournir les informations nécessaires afin d'orienter vers l'un de ses procédés selon les paramètres spécifiques de chaque projet. Chaque famille d'assemblage a son propre procédé de pose donnant à la fois une géométrie finale et des champs de contraintes différents selon la technologie choisie. La tenue mécanique en est affectée par la même occasion. Le choix du procédé d'assemblage résulte du mode de sollicitation auquel le point d'assemblage doit répondre en priorité et à la possibilité de réalisation industrielle de la pose. Les informations suivantes concernent l'assemblage mécanique d'alliage d'aluminium.

Il est fortement conseillé de positionner les zones d'assemblages éloignées des zones de fortes concentrations. La zone d'assemblage est un point fragile de la structure.

### 2.2.1 Rivetage

Le rivetage consiste à introduire un rivet dans un alésage commun aux pièces à assembler. Le rivet sera ensuite déformé plastiquement à l'aide d'un outil particulier (bouterolle) jusqu'à ce que l'alésage soit complètement rempli rendant alors solidaire les deux pièces à assembler, il n'y a pas possibilité de mouvement relatif entre les deux pièces. De ce fait, le rivetage ne permet pas de démonter l'assemblage après montage. Les diamètres courant utilisés vont de 4 à 24 mm. Dans le cas de l'assemblage de pièce en aluminium le rivet est le plus souvent du même alliage que les pièces à assembler afin d'éviter les risques de corrosion galvanique.

#### Résistance mécanique

Un assemblage riveté présente une bonne tenue mécanique en cisaillement, d'ailleurs la condition générale de calcul vérifie la résistance au cisaillement du rivet. Il est préconisé d'éviter un chargement parallèle à l'axe du rivet. Dans le cas d'un rivet en alliage 6061T4 la résistance au cisaillement atteint 160 MPa. (20). Le perçage de la pièce à assembler peut entraîner un affaiblissement de celle-ci (figure 2.5), c'est pour ça qu'il est recommandé de vérifier la résistance en traction de la pièce en sa section la plus défavorable.

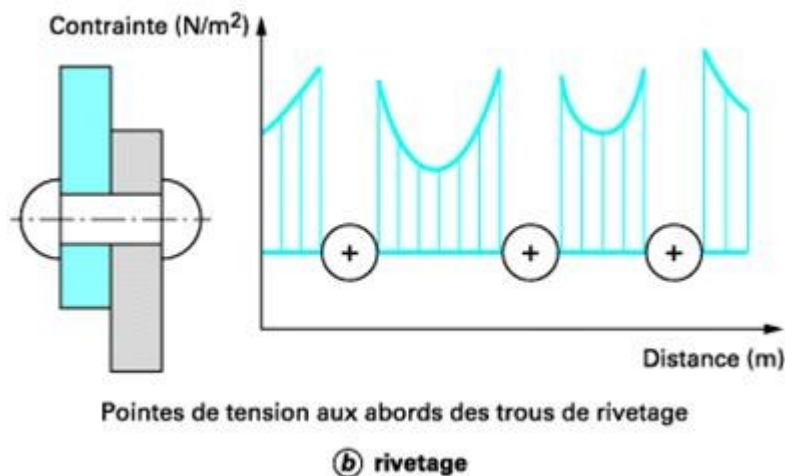


Figure 2.5 : Concentration de contrainte au niveau du trou du rivet

#### Forme des surfaces du produit

Un rivet est très rarement utilisé seul afin de répartir la charge. Il est nécessaire de respecter une distance minimale entre chaque rivet afin d'éviter l'amorce de fissure et un écrouissage lors du perçage de la pièce. Ces distances sont à respecter absolument dans le cas d'un assemblage sollicité en fatigue. Ces distances à respecter nécessitent donc de disposer d'une surface plane suffisante pour réaliser l'assemblage. (20)

### Résistance à la fatigue

Les amorces de fissure apparaissent en général au niveau des trous de rivet. En effet l'exécution des trous ou la mise en place des rivets peuvent provoquer un défaut dans le trou. La résistance à la fatigue dépend de nombreux paramètres tel que la géométrie du rivet, la longueur de la tige, l'épaisseur de la tôle, la force de serrage, le degré de remplissage du trou et la contrainte moyenne (21). Ces paramètres peuvent modifier de plus de 50% la valeur de la résistance à la fatigue. Un assemblage riveté présentera une résistance plus élevée dans le cas d'un chargement alternée (traction et compression) qu'un chargement de traction oscillante (de l'ordre de 30%) (22). La figure 2.6 présente une courbe de fatigue pour un assemblage riveté en acier.

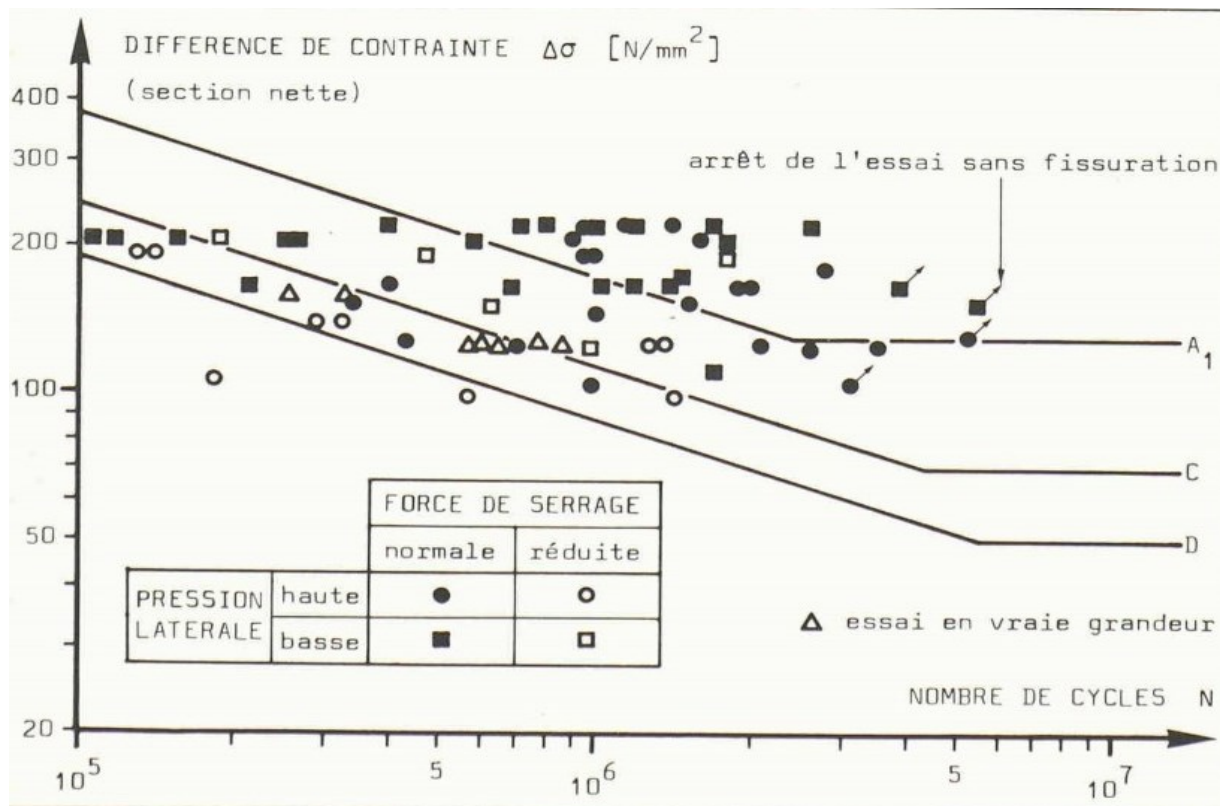


Figure 2.6 : Courbe de fatigue pour un assemblage riveté (22)

---

Récapitulatif :

- Sollicitation statique : en cisaillement ;
- Fatigue : dépend de nombreux paramètres, privilégié des sollicitations alternées, amorce de fissures au niveau des trous de rivets, la tenue en fatigue d'un rivet est faible par rapport à sa tenue sous contrainte statique;
- Forme des surfaces : Nécessite une surface plane suffisante pour positionner les rivets. De plus les surfaces doivent être accessibles pour l'installation du rivet. Non démontable. Ajout de poids du fait de l'ajout de pièce intermédiaire.

Le procédé de rivetage est conseillé pour des assemblages soumis à des sollicitations statiques. Le procédé peut être automatisé ce qui le rend viable pour des productions de série tel que l'assemblage des carrosseries au châssis.

### 2.2.2 Assemblage boulonné

Le boulonnage consiste à lier deux plaques à l'aide d'une vis filetée et d'un boulon par application d'un couple de serrage. Il existe un très grand nombre de références de boulonnerie dans le monde de la mécanique ce qui a conduit l'AFNOR (23) à une normalisation des éléments d'assemblage fileté. Les structures boulonnées présentent l'avantage de leur facilité de mise en œuvre. On peut dissocier deux grandes familles de boulon, les boulons ordinaires et les boulons précontraints. Les boulons ordinaires travaillent en cisaillement lorsque les corps des vis viennent en contact avec les pièces donc après un déplacement aléatoire dépendant du jeu. Ces boulons ne sont utilisés que dans le cas d'assemblage très peu sollicité et nécessitant peu de précision. Dans la suite on s'intéressera uniquement au boulon précontraint. On s'intéressera à la résistance de l'assemblage et non celle de la vis ou du boulon seule.

La résistance mécanique d'un assemblage boulonné dépend principalement de la valeur de la précharge. La précharge est l'application d'un couple à l'aide d'une clé ce qui va entraîner un effort de tension dans le boulon et donc un effort de compression dans les pièces assemblées (figure 2.7). L'installation d'une précharge judicieusement calculée permet au boulon de ne pas travailler en cisaillement dans le cas de sollicitation tangentielle, conditionne les effets de déserrage sous l'action des sollicitations, permet une meilleure utilisation des caractéristiques mécaniques des boulons (et donc d'en baisser le nombre sur un assemblage).

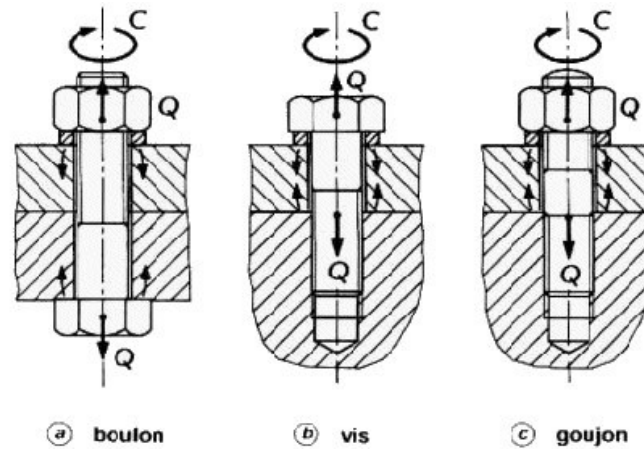


Figure 2.7 : Application d'un couple de précharge

### Résistance mécanique

La précharge permet à la vis de travailler uniquement en traction-compression. Une vis présente des valeurs de résistance statique élevée (dépendamment de leur qualité) qui peuvent atteindre les 1000MPa de résistance mécanique (24). Un assemblage boulonné présente donc une très bonne résistance mécanique a tout type de sollicitation grâce à la précharge.

### Résistance à la fatigue

En l'absence de précharge sur la vis, la tenue dynamique de la liaison va être faible, aux alentours de 50MPa. Cependant la détermination de la précharge dans le cadre de sollicitation dynamique est complexe et doit être précise. La précharge doit imposer une contrainte alternée dans la vis inférieure à sa résistance en fatigue de l'ordre de 50MPa.

Toute la difficulté se situe donc dans la détermination de cette valeur de précharge ce qui peut être complexe selon le type de sollicitation de l'assemblage.

### Forme des surfaces du produit

L'installation d'une vis nécessite une surface plane suffisante pour la tête de vis. La zone doit être accessible pour pouvoir serrer la vis avec une clé dynamométrique. S'il est nécessaire d'ajouter d'autres vis les mêmes règles d'espacement s'appliquent qu'au rivetage. Ce procédé entraine une augmentation du poids par l'ajout de pièces.



---

Récapitulatif :

- Sollicitation statique : Tout type de sollicitation ; Très bonne tenue mécanique;
- Fatigue : Complexité de déterminer la valeur de précharge qui détermine la résistance à la fatigue;
- Forme des surfaces : Nécessite une surface plane

Le boulonnage présente les meilleurs garantis en terme de résistance mécanique car le procédé est pleinement maîtrisé. Cependant il est peu automatisable, il est donc prescrit pour des productions de faible quantité ou la fabrication de pièces de grande dimension.

### 2.2.3 Le Soudage

Le soudage consiste à réunir de façon permanente deux ou plusieurs éléments, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler soit par chauffage soit par pression. Le soudage s'applique à tous les matériaux métalliques, il est grandement utilisé dans le domaine de la construction et du transport. Il existe de nombreux procédés de soudage TIG, MIG (les plus utilisés dans la construction automobile), par laser, par plasma, par résistance et dernièrement par friction.

Lors du soudage, les alliages d'aluminium à durcissement structural subissent un adoucissement dans la zone affectée thermiquement.

#### **Résistance mécanique**

On peut dénombrer 3 niveaux de résistance mécanique : celui du métal de base, celui de la zone affectée thermiquement et celui de la soudure. La résistance mécanique de la zone affectée thermiquement dépend de l'alliage, de son état métallurgique, de la méthode de soudage. La résistance dans la soudure dépend du métal d'apport et des alliages du métal. Le soudage présente de bonnes caractéristiques quelle que soit la sollicitation.

A titre d'exemple un alliage 6061T6 soudé avec un métal d'apport 5356 présente une résistance élastique de 140 MPa et une résistance mécanique de 165 MPa. (25)

### **Résistance à la fatigue**

Il y a de très nombreux paramètres influençant la résistance à la fatigue d'un cordon soudé. On peut citer l'état de surface, les contraintes résiduelles par le soudage, la forme des cordons de soudure et les imperfections d'accostage. La résistance en fatigue d'un cordon de soudure peut atteindre 50 à 70% de celle du métal de base (25), mais pour cela il est nécessaire de maîtriser pleinement tous les paramètres. Les courbes de fatigue dépendant de la géométrie du cordon, il est rare d'avoir à sa disposition la courbe S-N de son joint, particulièrement pour les alliages d'aluminium.

Le calcul de la résistance en fatigue d'un cordon de soudure est détaillé dans la section 2.6 de ce document.

### **Forme des surfaces du produit**

Lors de la conception d'un joint soudé il est nécessaire de faciliter l'accès au joint soude afin de permettre le passage de la torche et de l'équipement de soudage, faciliter le contrôle visuel du joint soudé. De plus il peut être nécessaire de préparer le joint par l'ajout de chanfrein afin d'avoir une pénétration suffisante.

Récapitulatif :

- Sollicitation statique : Tout type de sollicitation ; Très bonne tenue mécanique;
- Fatigue : Bonne tenue mécanique à condition de maîtriser les nombreux paramètres
- Forme des surfaces : Nécessite un travail sur la géométrie du joint afin d'avoir une pénétration suffisante. Non démontable

Le soudage présente de bonnes caractéristiques mécaniques tant en statique qu'en fatigue à condition de maîtriser le procédé. De très nombreux paramètres rentrent en jeu dans la détermination de la durée de vie en fatigue. Des essais expérimentaux sont indispensables pour valider la forme du joint afin d'éviter d'avoir un bris de la pièce inopiné.

Ce procédé permet une automatisation élevée, c'est pour cela qu'il est fortement utilisé dans les chaînes de production de véhicules. De plus il est facile à mettre en œuvre.

## 2.3. Critères de conception général

Avant la phase de conception détaillée d'un châssis, ou d'une autre pièce structurale, le concepteur doit définir un certain nombre de critères de conception. Ces critères vont permettre de définir les objectifs chiffrés à atteindre. Il existe de nombreux critères de conception en termes de fatigue (limite de rupture à la fatigue), rigidité (coefficient de raideur), prix, masse, entres autres. Le choix du critère dépend du cahier des charges et des priorités fixées par le développeur, selon l'utilisation du produit. Dans le cas de la conception d'un châssis, on utilise la plupart du temps le critère de fatigue comme critère prépondérant puisque le châssis est un élément structurel. Un facteur de sécurité à la fatigue ou à la rupture est employé. Ce facteur de sécurité est dépendant entre autre de la géométrie et de l'épaisseur des profilés qui constituent le châssis. La géométrie du châssis en acier présente un facteur de sécurité très élevé, supérieur à la durée de vie souhaitée. Les premières géométries de châssis en aluminium développées par M. Tacher et Y. Mogenot se basent sur ce critère. Une étude plus approfondie de la littérature a montré qu'un autre critère mécanique est aussi critique que celui de la durée de vie en fatigue. Le critère identifié est la rigidité du châssis. Chaque critère est décrit de façon plus précise dans les parties suivantes.

La définition des critères fournit des outils et des pistes de travail au concepteur. Deux approches s'offrent à lui ; la création à partir d'une feuille blanche ou à partir d'un châssis existant.

## 2.4. Critères de conception imposés

Afin d'obtenir un véhicule présentant le meilleur comportement sur la route et réalisable industriellement, des critères de conception ont été imposés par l'entreprise. On peut ainsi identifier trois critères principaux, soit la rigidité, la durée de vie, le coût et le poids.

L'entreprise a fixé pour ces différents critères, des objectifs à atteindre.

- Critère de rigidité

La rigidité a un impact sur le ressenti du pilote lors de la conduite du véhicule. Ce ressenti ne peut pas être quantifié par une valeur limite de déplacement ; il faut tester le comportement du châssis lors d'essais sur route pour évaluer ce critère. De plus, ce critère est subjectif car chaque

pilote a un ressenti différent. Le critère de rigidité est donc un critère relatif. L'objectif est de réaliser un châssis présentant une rigidité équivalente ou supérieure au châssis d'un ancien modèle (Roadster 2009 présenté à la figure 2.10) présentant une très bonne tenue de route. Le critère de rigidité doit être le critère prépondérant dans l'étude du châssis d'un véhicule.

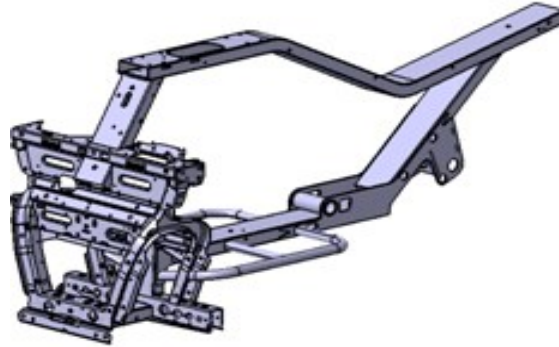


Figure 2.8: Châssis Roadster 2009

- Critère de durée de vie

Le châssis est un élément structural et conséquemment, un critère important pour ce genre d'élément est la tenue en fatigue. Il est connu que les caractéristiques mécaniques de résistance sont plus faibles sous une sollicitation dynamique que statique. Dépassée une certaine valeur de contrainte, il y aura bris de la pièce après l'application d'un certain nombre de cycles de chargement. Ce nombre de cycles définit la durée de vie. L'entreprise fixe une durée de vie devant atteindre une durée de 10 ans, ce qui correspond en moyenne à 50 000 km parcourus par le véhicule.

Il est nécessaire de fixer le critère permettant de juger si la pièce est inapte au service. Ce critère est fixé par l'entreprise et dépend du rôle de l'assemblage ; dans le cas de structures pouvant causer des blessures à une personne, ce critère est très sévère. Il est possible, en observant la contrainte et la déformation d'un matériau, d'identifier clairement s'il y a présence d'une déformation plastique associée à un endommagement du matériau. Il est pratique courante de considérer qu'il y a rupture de la pièce testée lorsque la contrainte baisse brutalement pour une déformation donnée ou vice versa. Cependant, plusieurs autres critères de rupture comme la rupture totale de l'échantillon ou l'apparition d'une fissure d'une certaine longueur peuvent être

utilisés. Pour le Roadster, la vie du pilote étant en jeu ainsi que le risque de provoquer un accident, la rupture de la pièce est définie par la première apparition de fissure sur la pièce,

- Critère de poids et de coût

Le principal intérêt de passer d'un châssis en acier vers un châssis en aluminium est la réduction de poids de l'ensemble châssis. La masse du véhicule étant directement reliée à sa consommation et à son autonomie (présentées dans la partie introduction) il est primordial de diminuer la masse du châssis. L'entreprise a fixé comme objectif une diminution de la masse totale de 20%. Cependant, il est nécessaire de garder à l'esprit que le véhicule Roadster est dédié à la vente au grand public. Il est donc primordial de minimiser les coûts engendrés par le changement de matériau. Une limite de 5\$/kg gagné par rapport à la version acier a été fixée.

## 2.5. Validation des critères : Méthodes mises en place

Dans la section précédente ont été présentés les principaux critères, tandis que dans cette section on va décrire d'une façon plus précise les méthodes employées pour converger vers une solution optimale tout en respectant les critères de conception imposés. On peut mettre en opposition deux approches selon les critères retenus, soit une approche absolue pour le critère de fatigue à mettre en opposition à une approche relative pour le critère de rigidité.

### 4.3.1. Critère de rigidité

Le critère de rigidité est un critère relatif. En effet, on compare la rigidité des concepts en aluminium au châssis de référence en acier du Roadster 2009. Il est nécessaire dans un premier temps, d'évaluer la rigidité du châssis de référence en acier. La première étape est de créer un modèle numérique de la géométrie du châssis sur un logiciel d'éléments finis. La deuxième étape est de créer une méthode permettant de définir et de comparer facilement la rigidité des châssis. La rigidité est déterminée en flexion et en torsion. La dernière étape est de comparer les résultats et de réaliser des itérations sur la géométrie du châssis en aluminium afin d'obtenir la rigidité souhaitée. Ce travail est réalisé par C. Iorga (26); plusieurs concepts ont ainsi été créés prenant en compte les différentes modifications apportées au projet.

#### 4.3.2. Critère de fatigue

Le critère de fatigue est un critère absolu. A l'opposé de l'étude de la rigidité, on va s'appuyer ici sur des valeurs tabulées que l'on va trouver dans la littérature telles que les courbes d'endurance. Il est possible, en connaissant le niveau de contraintes, de déduire la durée de vie du châssis. Cependant, les données disponibles sont moins nombreuses pour l'aluminium que pour l'acier ; plus particulièrement les informations concernant le 6061T6, qui sont conservées par les industriels. De plus, dans le cas du châssis, des soudures affaiblissent la structure. Le comportement en fatigue d'une pièce est toujours atténué par la présence d'une soudure. L'évaluation de la durée de vie en fatigue se fait à l'aide de modèles empiriques développés expérimentalement qui donnent une grande variabilité des résultats. L'analyse effectuée sur le modèle numérique du système châssis fournit des résultats admettant une erreur importante au niveau du cordon de soudure par rapport aux essais expérimentaux. Il sera donc nécessaire de réaliser préalablement des essais expérimentaux locaux (sur les joints les plus sollicités), pour déterminer les caractéristiques des cordons de soudure et leur impact sur la tenue en fatigue de la structure.

#### 4.3.3. Critère de prix et de masse

L'objectif principal du projet est de réduire la masse totale du châssis pour une augmentation de prix la plus basse possible. Il est donc nécessaire de développer des outils pour déterminer le coût des procédés d'assemblage. Le prix de fabrication des différents concepts de châssis sera évalué ainsi que leur masse. Ces travaux seront résumés dans les travaux publiés par C. Iorga (26).

## 2.6. Étude de la fatigue

La fatigue est le phénomène qui décrit l'endommagement et éventuellement la rupture d'une structure soumise à un chargement dynamique. On peut trouver la définition suivante pour la fatigue : *la fatigue est le processus de transformation local, progressif et permanent de la microstructure d'un matériau soumis à des conditions entraînant des variations de contraintes et de déformations par endroits ; pouvant résulter en fissures ou en une rupture complète après un nombre suffisant de fluctuations*. Il est ainsi possible d'obtenir la rupture d'une pièce sans

jamais obtenir des contraintes dépassant la résistance ultime du matériau et même la résistance élastique lors d'un chargement cyclique.

La rupture par fatigue est le fait de l'initiation et la propagation de fissure. On peut décrire l'endommagement en 3 étapes : l'initiation d'une fissure, la propagation de cette fissure et la rupture finale de la pièce.

L'initiation de fissure se produit couramment dans les zones de concentration de contrainte. Les microfissures se forment dans les plans cristallins qui glissent les uns sur les autres à un angle de  $45^\circ$  de l'axe de traction sur une certaine distance. Il est toutefois à noter que la distinction entre la phase d'initiation et de propagation n'est pas encore clairement définie.

Les initiations de fissure finiront par se rejoindre ; c'est à partir de cette étape que l'on rentre dans la phase de propagation de fissure. Celles-ci se propageront ensuite perpendiculairement à la contrainte exercée. On peut évaluer la vitesse de propagation d'une fissure à l'aide de la relation de Paris. La progression de la fissure va laisser apparaître sur la pièce des stries permettant d'en suivre l'évolution au cours du cyclage.

$$\text{Relation de Paris : } \frac{da}{dN} = C \times \Delta K^n \quad (2-1)$$

où :  $\frac{da}{dN}$  est l'avance de la fissure par cycle

$C$  et  $n$  sont des constantes du matériau et des conditions de sollicitation

$\Delta K$  est le facteur d'intensité de contrainte

La dernière étape est la rupture de la pièce qui intervient lorsque le facteur d'intensité de contrainte atteint une valeur limite. Une fois cette valeur limite atteinte, la fissure se propage brutalement.

On retrouve deux types de fatigue affectant les pièces mécaniques utilisées en industrie. La fatigue olygocyclique concerne les chargements où la rupture intervient à bas nombre de cycles. Dans ce cas, la valeur de contrainte est telle qu'à bas nombre de cycles des déformations locales

interviennent dans le matériau. La seconde est la fatigue a grand nombre de cycle ou la rupture intervient après un grand nombre de cycle. Dans celle-ci les effets des irrégularités géométriques ont un très fort impact sur la durée de vie.

La méthode la plus répandue et la plus utilisée pour caractériser les métaux en fatigue est la méthode de Wöhler. Elle fait la relation entre le nombre de cycles à la rupture et la contrainte sous la forme d'une courbe, figure 2.11. On retrouve habituellement sur cette courbe une partie horizontale correspondant à la limite de rupture pour un nombre de cycle très faible, une droite sur une échelle logarithmique suivie d'une limite d'endurance constituée d'une asymptote horizontale pour certains matériaux. Cette relation est souvent représentée par la formulation suivante.

$$\log(N) = A + \log(S) \quad (2-2)$$

où :  $N$  est le nombre de cycles

$A$  est la constante du matériau

$S$  est la variation de contrainte

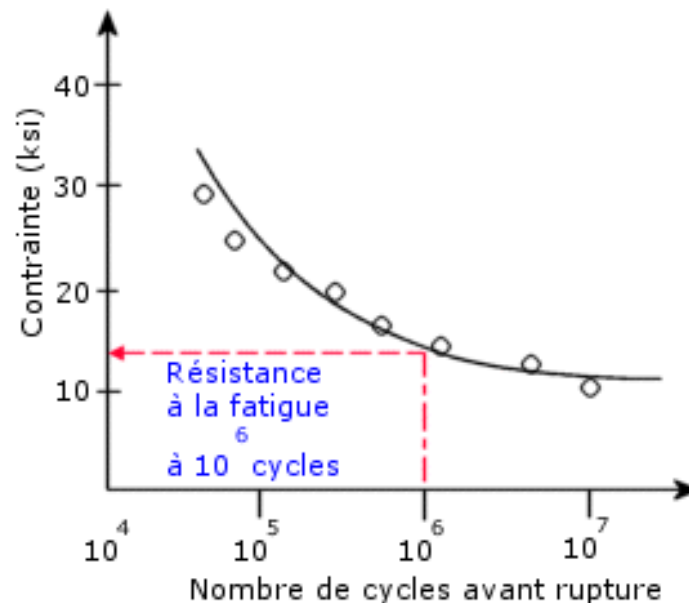


Figure 2.9: Courbe de Wöhler (26)

Ce genre de courbe est obtenu à partir des essais de fatigue en traction-compression uni-axiale sur des éprouvettes normalisées, de différentes formes, plaques, tubes de section rectangulaire, cylindrique. Il n'existe donc pas de courbe de Wöhler pour des géométries complexes dans la



littérature à cause du coût important en argent et en temps de ces essais. Si on veut connaître cette courbe pour une géométrie particulière, il est nécessaire de réaliser les essais de fatigue. Les facteurs affectant la vie en fatigue de la structure réelle, tels que les concentrations de contrainte due à la géométrie, les valeurs de contraintes moyenne, doivent être évalués à l'aide d'autres équations.

### Cumul des dommages

La loi de sommation de Palmgren-Miner a été utilisée pour calculer le dommage causé par les différents cycles. Elle permet de faire un cumul linéaire des dommages. Cette loi permet de contraindre une limite des essais en laboratoire : le fait que les déformations et contraintes appliquées sont d'amplitude constante alors que la majorité des problèmes de fatigue sont soumis à des amplitudes variables dans le temps.

$$\sum_{j=1}^k \left( \frac{N}{N_f} \right) = 1 \quad (2-3)$$

où :  $N$  est le nombre de cycles pour une valeur de contrainte due à un chargement

$N_f$  est le nombre de cycles à la rupture pour une contrainte  $\sigma$

La loi de dommage nécessite de connaître le nombre de cycles à la rupture. Cette information est obtenue à partir de la courbe S/N suivante (figure 2.12).

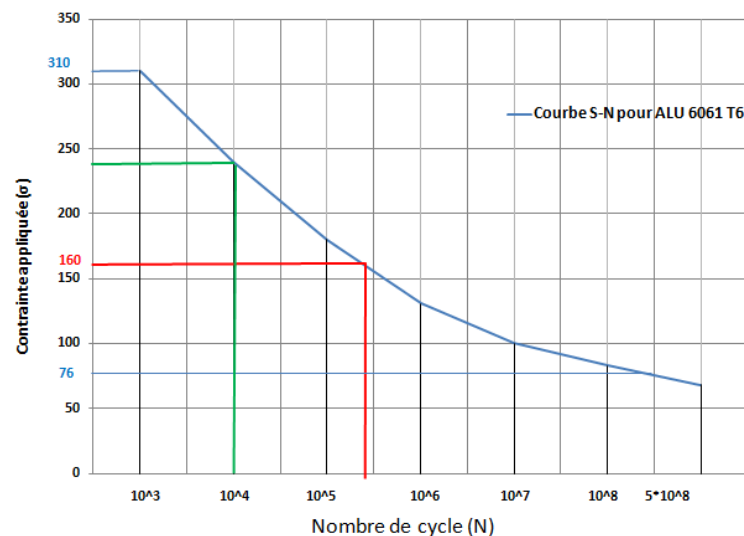


Figure 2.10: Courbe S/N pour 6061T6 (26)

### 2.6.1 Énoncés généraux sur les alliages d'aluminium et d'acier

L'acier est le matériau le plus utilisé depuis des siècles et il compte pour plus de 90% de la production mondiale de métaux. Son comportement en fatigue est connu de façon plus approfondie que pour tout autre matériau. Il y a de nombreux ouvrages qui traitent de ce sujet et qui proposent des guides de conception. Les prochaines lignes décriront de façon générale le comportement de l'acier et l'aluminium en fatigue et les différences entre ces deux matériaux. Les aciers possèdent une asymptote sur la courbe de Wöhler, ce qui veut dire qu'en dessous d'une certaine valeur de contrainte, la durée de vie est infinie pour la pièce. La valeur de cette contrainte limite est appelée limite d'endurance en fatigue et est estimée à environ la moitié de la résistance ultime. Il existe de nombreuses relations reliant les différentes propriétés de l'acier. On remarque aussi une augmentation de la limite d'endurance avec l'augmentation de la fréquence du cyclage.

Notre étude se focalise sur l'étude des cordons de soudure ; il est important de connaître leur comportement à la fatigue. Les aciers sont simples d'utilisation pour le soudage étant donné leur potentiel d'oxydation faible. Cependant, le soudage entraîne la formation de zones martensitiques dans la soudure à cause du fort gradient de température généré localement. Ces zones sont plus dures et donc plus propices à la propagation de fissures.

Intéressons-nous maintenant au cas de l'aluminium. Les aluminiums offrent des caractéristiques très différentes de celles de l'acier. Les aluminiums ne possèdent pas d'asymptote sur la courbe de Wöhler. Donc théoriquement, on peut atteindre la rupture d'une pièce en aluminium, quel que soit la valeur de la contrainte. Pour les métaux non ferreux, une limite d'endurance artificielle a été imposée à  $10^7$  cycles. Ces valeurs de cycles sont considérées habituellement comme une durée de vie infinie ; une autre pièce de l'assemblage subira un bris avant.

L'aluminium possède des caractéristiques mécaniques qui peuvent poser des problèmes lors du soudage. L'aluminium possède un fort coefficient de dilatation thermique ainsi qu'un fort potentiel d'oxydation ce qui entraîne une zone affectée thermiquement, ZAT, étendue. De plus, le soudage peut annuler certains traitements thermiques ce qui peut entraîner une forte diminution des caractéristiques mécaniques.

### 2.6.1 Énoncés généraux sur les soudures et leur endommagement en fatigue

Dans cette section, on s'intéresse à l'impact de la soudure sur le comportement en fatigue. La soudure est un procédé d'assemblage largement utilisé dans la fabrication mais on rencontre encore de nombreux bris au niveau des cordons de soudure. On peut dénombrer un certain nombre de raisons qui engendrent le bris en service :

- Le manque de connaissances des chargements et des cycles en service;
- Le manque de connaissances de l'environnement de service;
- De mauvaises spécifications de conception;
- Un mauvais usage des méthodes de conception et un manque de considération des modes de rupture fondamentaux;
- L'usage de mauvais matériaux pour les caractéristiques désirées;
- Un mauvais choix de matériaux et de techniques de soudure;
- Un manque d'inspection pendant la fabrication et une trop grande variabilité du procédé;
- Une utilisation de la pièce au-delà des spécifications de conception.

Un cordon de soudure abaisse toujours le comportement en fatigue d'une pièce. Cette diminution est expliquée par :

- Les changements microstructuraux dans et autour de la soudure;
- La concentration de contraintes causée par les imperfections de la soudure;
- La concentration de contraintes due à la géométrie du joint et de la soudure;
- Les contraintes résiduelles.

Le premier point engendre une diminution de la limite d'endurance tandis que les 3 points suivants contribuent à une augmentation du niveau de contraintes dans la soudure.

De plus, les soudures présentent des imperfections au niveau microstructural. Les joints constituent en eux-mêmes une discontinuité dans l'assemblage. Les imperfections de soudure peuvent être rangées dans trois groupes distincts : les imperfections planes, de volume et de géométrie. Les plus critiques sont les imperfections planes qui provoquent des facteurs de

concentration de contraintes élevés. Le nombre d'imperfections, leur dimension ont également une grande influence sur le comportement en fatigue de l'assemblage soudé, ce qui augmente l'aspect statistique de la fatigue puisque chaque cordon de soudure aura une composition différente. Ce point sera abordé par la suite.

La géométrie du cordon de soudure a un fort impact sur la tenue en fatigue de l'assemblage. Plusieurs paramètres ayant une influence sont présentés dans plusieurs ouvrages : on recense ainsi l'épaisseur de la plaque mère, la longueur d'attache pied à pied, l'épaisseur de la plaque soudée, le rayon de soudure, l'angle d'attaque de soudure et le profil de cordon ainsi que la longueur du joint soudé. Du fait de la géométrie, les fissures ont tendance à s'amorcer au niveau du pied du cordon dans le cas d'un cordon avec une bonne pénétration. Dans le cas d'un cordon avec une pénétration partielle, le point de fissuration va se plutôt se situer au niveau de la racine de la soudure. La figure 12.3 présente la position des différentes zones géométriques d'un cordon de soudure.

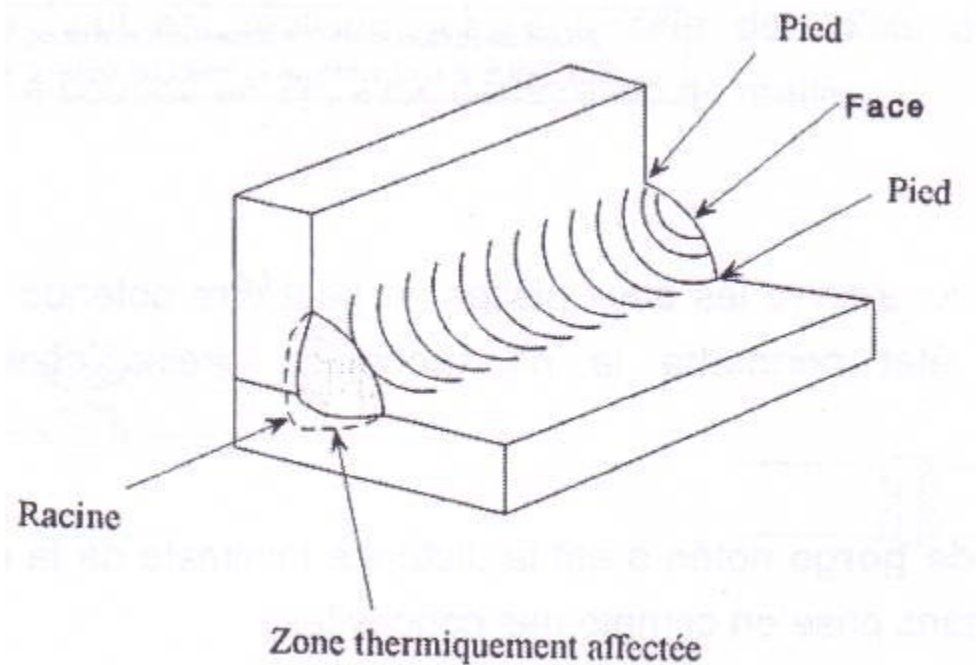


Figure 2.11: Description d'un cordon de soudure (<http://poste-a-souder.comprendrechoisir.com/comprendre/soudure-aluminium>)

Il existe des méthodes permettant d'améliorer la tenue en fatigue des cordons de soudure. Il est possible d'améliorer une soudure en diminuant les contraintes résiduelles ou en changeant la géométrie du joint. Il est possible d'augmenter grandement la résistance à la fatigue d'un cordon

en introduisant des contraintes résiduelles ou en polissant la surface pour enlever les dépressions en pied de soudure à l'aide de techniques telles que le grenaillage et le martelage.

Une autre problématique que pose l'étude d'un cordon de soudure est la très forte variabilité de ce procédé. En effet, la fatigue est un phénomène considéré comme aléatoire. La fatigue est fortement influencée par tout type de défaut présent sur la pièce tel que les hétérogénéités, inclusions, défauts de fabrication. Ces types de défaut sont très présents dans les alentours des cordons de soudure. De plus, un cordon de soudure aura une géométrie et des caractéristiques pouvant être fortement différentes selon le soudeur. Il est facile d'imaginer que la répétabilité de ce procédé est relativement faible. La fatigue, particulièrement celle des soudures, présente une très forte incertitude. Les différents modèles numériques développés admettent une erreur importante par rapport aux essais expérimentaux du fait de cette importante variabilité.

Ces différentes incertitudes peuvent se présenter sous la forme de variables aléatoires ou statistiques. Il est possible d'éliminer les sources de variabilité dans le cas des variables statistiques avec une bonne connaissance des phénomènes concernant la géométrie du joint, les propriétés du matériau.

## 2.6.2 Méthodologie d'étude des cordons de soudure

L'analyse en fatigue nécessite deux étapes pour déterminer la durée de vie d'une structure ; l'analyse contrainte-déformation à proximité des zones géométriques présentant des concentrations de contrainte et l'analyse du dommage. Il est donc nécessaire dans un premier temps de recenser toutes les zones géométriques présentant un comportement critique avant d'évaluer les contraintes et les déformations locales au niveau de ces zones critiques à l'aide de modèles analytique, expérimental ou numérique. Il faut ensuite déterminer l'état de contrainte (quels types de sollicitation ; uni-axiale ou multiaxiale ?).

La connaissance de ces premiers points permet de déterminer le dommage et ainsi de déterminer la durée de vie de la soudure. Dans le cas d'un chargement à amplitude variable, le dommage de chaque groupe d'amplitude sera cumulé pour toute la durée du chargement appliqué jusqu'à ce que le critère de rupture soit atteint.

Plusieurs méthodes d'analyse du dommage, particulières aux joints soudés, ont été développées pour étudier la tenue en fatigue sous un chargement quelconque. Trois méthodes seront ainsi détaillées : la contrainte nominale, la contrainte hot spot et la contrainte locale. Ces méthodes reposent toutes sur l'utilisation de courbes S-N expérimentales. La variance des résultats de ces méthodes va donc être très importante mais elle peut être diminuée à l'aide de relations empiriques obtenues à partir d'études numériques. La qualité des résultats provenant de ces méthodes va dépendre du nombre d'information que prend en compte chacune d'elles. La précision des résultats va augmenter avec le nombre de paramètres pris en compte ce qui aura un impact sur la complexité des calculs et le temps de calcul nécessaire.

La première méthode, la plus répandue et la plus simple, est la méthode de la courbe nominale (S-N). Cette méthodologie se repose sur un ensemble de courbes d'endurance permettant d'associer directement une amplitude de contrainte nominale à un nombre de cycles permettant l'initiation d'une fissure. Ces courbes ont été obtenues de façon expérimentale lors d'une grande campagne de recherche sur la fatigue des joints menées pendant les années 1970. Cette étude a permis le classement des joints en plusieurs catégories, chaque groupe possédant une courbe S-N spécifique. De nombreux organismes ont participé à la campagne d'essais ce qui a amené la constitution de plusieurs classifications. Basées sur le même type d'essai, ces différentes classifications présentent les mêmes résultats (27).

La classification est composée de courbe S-N pour chaque combinaison possible de matériau (acier ou aluminium), de géométrie de joint, de direction de la contrainte principale maximale appliquée, et du lieu présumé de l'initiation de fissure. Pour déterminer la longévité en fatigue du joint soudé par cette méthode, il suffit de trouver la courbe S-N correspondant aux paramètres du joint étudié. Il est facile de comprendre que les joints proposés par les différents guides sont simples et peu nombreux. Il est à savoir que les essais pour concevoir une courbe de Wöhler sont coûteux et gourmand en temps. Ces guides ont été développés pour le secteur du bâtiment civil et du domaine maritime ; les géométries de joint qui ont été testées pour faire ce guide appartiennent à ces domaines. Ces guides datant pour la plupart des années 70 ne proposent qu'une faible variété de joints en aluminium du fait de la faible utilisation de ce matériau à cette

époque. La méthode de la courbe S-N nécessite que le cordon de soudure étudié ait exactement les mêmes paramètres que celui du guide pour que les résultats soient fiables. Des facteurs de sécurité élevés sont introduits et sont ajoutés dans la conception pour passer outre l'incertitude importante des cordons de soudure. Le facteur de sécurité le plus souvent utilisé est d'indiquer dans les guides, la limite inférieure des résultats en fatigue obtenus par les essais expérimentaux. Les soudures présentes sur le châssis du Roadster sont grandement différentes de celles trouvées dans les guides de conception. Cette méthode est pour de ce fait difficilement applicable au problème de fatigue sur les véhicules récréatifs.

La deuxième méthode est l'approche de la contrainte « hot spot », développée initialement pour la conception de structures tubulaires et pour les structures soudées de navires puis répandue à toutes les constructions soudées en acier et en aluminium depuis quelques années. L'approche hot spot est basée sur la corrélation entre une contrainte en pied de soudure et une résistance en fatigue. Cette approche est jugée plus fiable et précise que l'approche nominale et devrait être préférée à celle-ci. Ce concept est adapté au calcul de vie en fatigue de géométries complexes telles que les soudures et autres structures où il est impossible de calculer la contrainte locale ou inefficace d'utiliser l'approche nominale.

Le hot spot est le point critique dans le joint soudé où la fissure s'initie. La valeur de la contrainte structurelle en surface à ce point se trouve à être la somme des contraintes axiales et de flexion de membrane, plus une contrainte due à la présence du cordon de soudure qui est non linéaire sur l'épaisseur de la membrane. Ce point critique dans le cas des joints soudés se situe le plus souvent au niveau du pied de cordon de soudure.

L'approche dite hot spot se base sur l'évaluation de la contrainte nominale et de la concentration de contrainte due à la géométrie du joint. La contrainte est estimée au niveau du pied de cordon de soudure car on sait par expérience et observation des assemblages soudés que les ruptures et apparition de fissures surviennent à cet endroit-là. La contrainte hot spot idéale est définie comme la plus grande valeur d'extrapolation de la distribution de contrainte principale en pied de soudure, immédiatement à l'extérieur de la région de concentration de contrainte due à la géométrie de soudure comme présenté à la figure 2.14. Cette extrapolation peut être basée sur

la mesure de deux ou trois jauges de déformation ou bien sur les résultats d'un modèle par éléments finis de la structure. La vie du cordon de soudure et donc de l'assemblage est ensuite estimée à l'aide d'une courbe S-N pour une classe de matériau et une géométrie de soudure. Cette approche permet de réduire le nombre de paramètres des courbes S-N mais pas de s'en passer ; ainsi elles ne prennent plus en compte que les propriétés du matériau, les effets de contraintes résiduelles et la forme de la soudure.

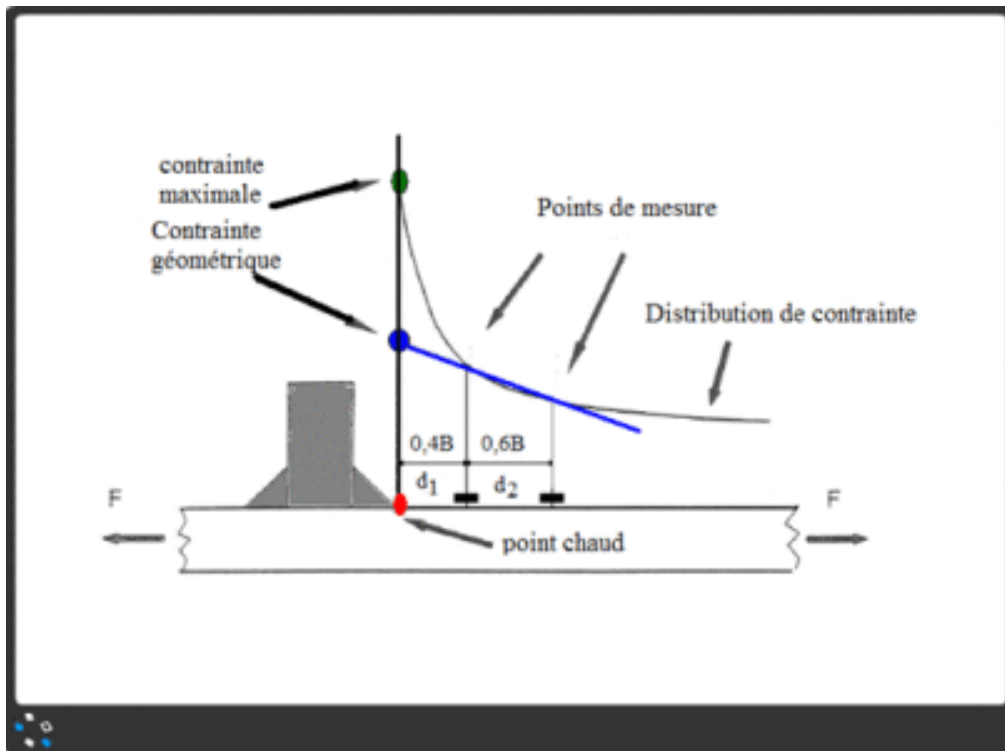


Figure 2.12: Distribution de contraintes au niveau du pied de soudure (28)

La contrainte hot spot peut être déterminée par trois méthodes : par un modèle d'éléments finis, par une approche expérimentale à l'aide de jauge de déformations et par une méthode analytique à l'aide d'un facteur de concentration de contrainte.

Il existe cependant certaines limites à l'approche hot spot ; en effet, la contrainte variable doit être transversale à la ligne de soudure. Il est impossible de déterminer la résistance et les contraintes dans d'autres types de soudures comme celles à angle à l'aide d'équations provenant de la mécanique du milieu continu ce qui complexifie fortement le problème. De plus, la fissure doit absolument s'amorcer au niveau du pied de soudure ce qui sous-entend que la soudure doit



avoir une pénétration totale. Dans le cas des cordons présentant un manque visible de pénétration, ils ne peuvent être analysés avec les données de contraintes obtenues par l'approche hot spot ; il est supposé dans ces cas que la propagation de fissure dominera la vie en fatigue qui peut être évaluée par une approche basée sur la mécanique de la rupture telle que la loi de Paris.

La dernière méthode est l'approche de contrainte locale. Elle tient compte de la géométrie du joint et de l'effet de la géométrie de la soudure. L'approche locale est basée sur la corrélation entre une contrainte non linéaire locale en pied de soudure et une résistance en fatigue. L'approche locale a été développée dans le cas où il est difficile de déterminer les contraintes nominales ce qui peut arriver pour une géométrie ou un chargement complexe. De plus, pour certaines géométries de cordon, il peut être difficile de trouver une équivalence géométrique avec les standards présents dans les tables. La fissuration en fatigue repose sur la plastification du matériau dans les zones de concentration de contrainte ; ce phénomène n'est pas pris en compte dans les deux autres approches. Il est donc nécessaire de connaître les déformations et contraintes locales au niveau du pied de soudure.

L'approche globale permet d'étudier tous les types de géométrie et de chargement, prend en compte de nombreux paramètres tels que la concentration de contrainte dû au fait qu'on s'intéresse aux déformations et contraintes locales, les propriétés du matériau, les contraintes résiduelles, la géométrie du joint et de la soudure. La prise en compte de nombreux paramètres entraîne cependant des analyses plus complexes dues au fait de la prise en compte des déformations locales. De plus, chaque soudure étant unique en termes de géométrie et de propriété, il peut être difficile d'obtenir des valeurs de contrainte.

## 2.7. Outils d'étude pour valider un joint

### 2.7.1 Analyse numérique

Les exigences en matière de sécurité dans le domaine des transports augmentent alors même que les industriels du secteur souhaitent réduire leurs délais de conception en employant le plus possible l'outil de simulation numérique (29). L'étude complète des assemblages nécessite des approches couplées numériques et expérimentales, figure 2.15 (30). La modélisation 3D

numérique est un outil qui permet d'étudier finement le comportement de l'assemblage jusqu'à sa rupture.

Cet outil numérique permet de déterminer des variables d'état et leur évolution difficilement accessible par l'expérimentation seule (30). Il permet de visualiser le comportement du joint à l'échelle du modèle de la structure.

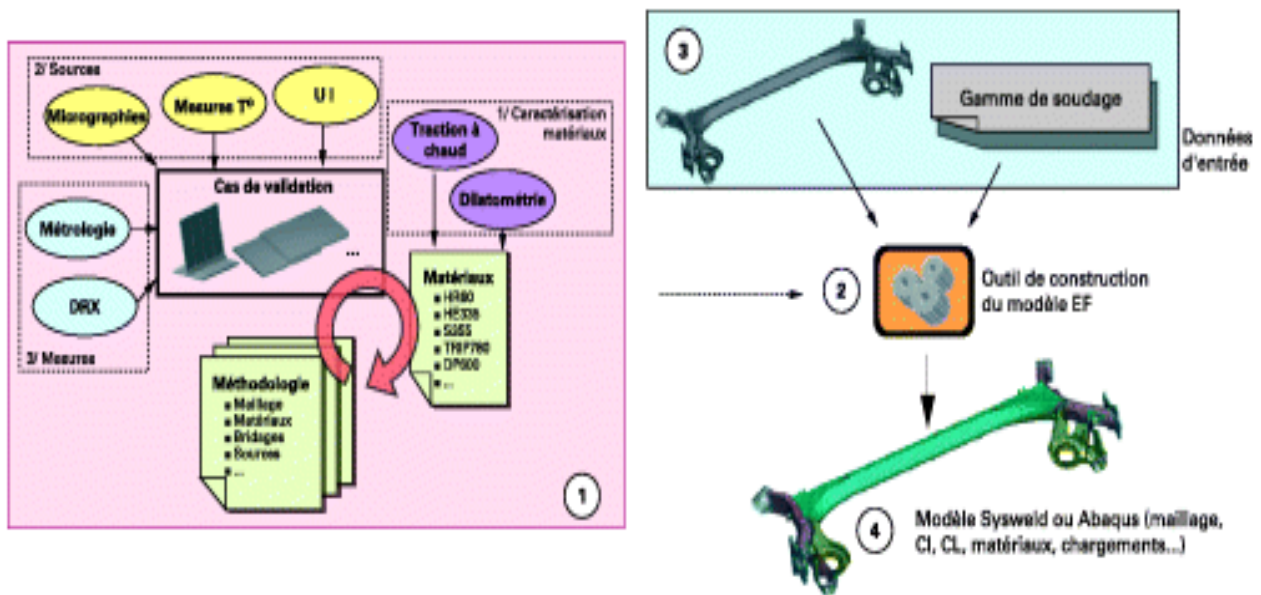


Figure 2.13: Démarche de développement et d'application de la méthodologie pour une étude par élément fini (36)

Les tailles des modèles d'éléments finis dans le domaine des transports se comptent aujourd'hui en centaines de milliers d'éléments de coques, de l'ordre de  $2 \cdot 10^5$  éléments pour une automobile. Le nombre important d'éléments se justifie par la nécessité de modéliser finement la géométrie des pièces pour représenter les modes de comportement fortement non linéaires, rencontrés lors de la ruine des structures (30)

Avant de commencer une étude par éléments finis, il est nécessaire de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau. Ces caractéristiques sont parfaitement connues grâce à des expérimentations aux moyennes et grandes vitesses de déformation (31) (32), au choix d'un modèle de comportement (Johnson, 1983) (30) d'endommagement et de rupture et enfin à l'identification des valeurs de ces paramètres matériaux par techniques directes ou inverses. (30). Par contre, peu d'études ont été réalisées concernant le comportement mécanique des

assemblages ; de nombreux progrès restent encore à faire. La plupart des modèles actuels sur les assemblages soudés ou rivetés utilisent des éléments de liaison rigides ou élastiques alors que le comportement global dépend de phénomènes fortement non linéaires (30).

Les modèles par éléments finis traitant des assemblages existant sont fiables pour des sollicitations simples et des éprouvettes simples. Ces modèles par éléments finis ont été validés par des méthodes de caractérisation, couplant les approches expérimentales et numériques (18). Il existe aujourd'hui très peu de logiciels de simulation numérique traitant du soudage. La société ESI a développé trois logiciels traitant de ce sujet SYSWELD, PAM-ASSEMBLY et WELD-PLANNER. Ces trois logiciels proposent des approches radicalement différentes de la simulation du soudage. Le premier utilise la méthode des éléments finis, le second repose sur une méthode dite locale globale et le troisième propose une approche simplifiée dite de retrait simplifié. Ces logiciels, les démarches et la méthodologie sont détaillés par (33)

Les travaux numériques réalisés dans le cadre de l'étude du châssis du Roadster ont été réalisés sur le logiciel ANSYS, un logiciel d'étude par éléments finis, figure 2.16. Une version numérique du châssis a été réalisée pour chacune des versions, soudée, rivetée et hybride.

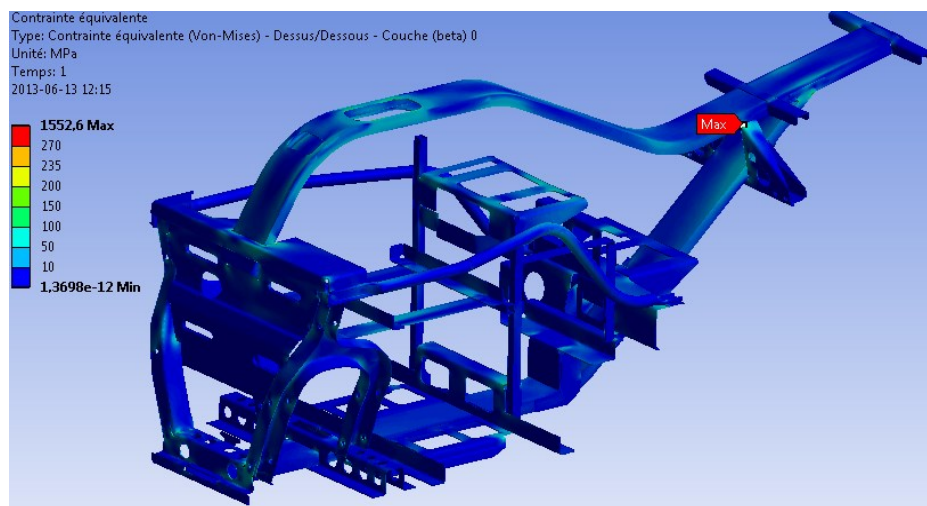


Figure 2.14: Modélisation sous Ansys de la version soudée (7)

Le travail sur le modèle par éléments finis permet de tester différentes versions sans avoir à fabriquer de prototype. Les trois versions du châssis conçues ont analysées et comparées. Cet outil permet de montrer la distribution de contrainte et les déplacements au sein du châssis.

Cependant, cet outil ne présente que des résultats en statique, or la fatigue est un phénomène dynamique ce qui signifie que certains phénomènes ne sont pas pris en compte.

Lors de la phase de conception, cet outil est particulièrement utilisé ; il permet d'observer les effets des modifications géométriques sur les contraintes. Les niveaux de contraintes sont ensuite comparés aux valeurs de la résistance mécanique et de fatigue.

Cependant, les valeurs de contraintes et de déplacement fournis par le logiciel au niveau des joints ne sont pas fiables. C'est pour cela entre autres, qu'il est nécessaire de réaliser des essais expérimentaux. Les résultats et les conclusions de l'étude par éléments finis sont donnés dans le document suivant (1).

### 2.7.2 Étude expérimentale

Les essais expérimentaux sont indispensables pour valider le développement d'un châssis. Ils permettent soit de valider la conception intégrale d'un châssis soit de donner des informations sur un choix de conception, par exemple la sélection d'un procédé d'assemblage.

Dans le cas de la validation intégrale du châssis, les essais expérimentaux permettent de valider les choix technologiques et les modèles numériques. Ils permettent entre autres d'observer le comportement du châssis dans un cas de chargement reproduisant le chargement réel. L'observation de la structure à la fin des essais va permettre de déterminer s'il y a présence de fissure ou de dégradation.

La version acier du châssis du Roadster, après avoir été testée par les outils numériques, a été testée expérimentalement (26). Une méthodologie de validation a été mise en place. Les essais expérimentaux sont basés sur la méthode de la courbe S-N, présentée dans les parties précédentes. Un gabarit est nécessaire pour reproduire les sollicitations réelles. Le châssis du véhicule est sollicité en flexion lors du freinage et par une combinaison de flexion et de torsion lors de virages.

Les essais expérimentaux ont été réalisés sur un banc équipé de deux vérins, figure 2.17 (26). Des jauges de déformation ont été placées dans les zones où on veut obtenir les valeurs des contraintes. Ces zones sont le plus souvent les zones avec les maximums de contrainte. Ces zones sont déterminées à l'aide des éléments finis. Dans ce cas, un seul échantillon est utilisé.

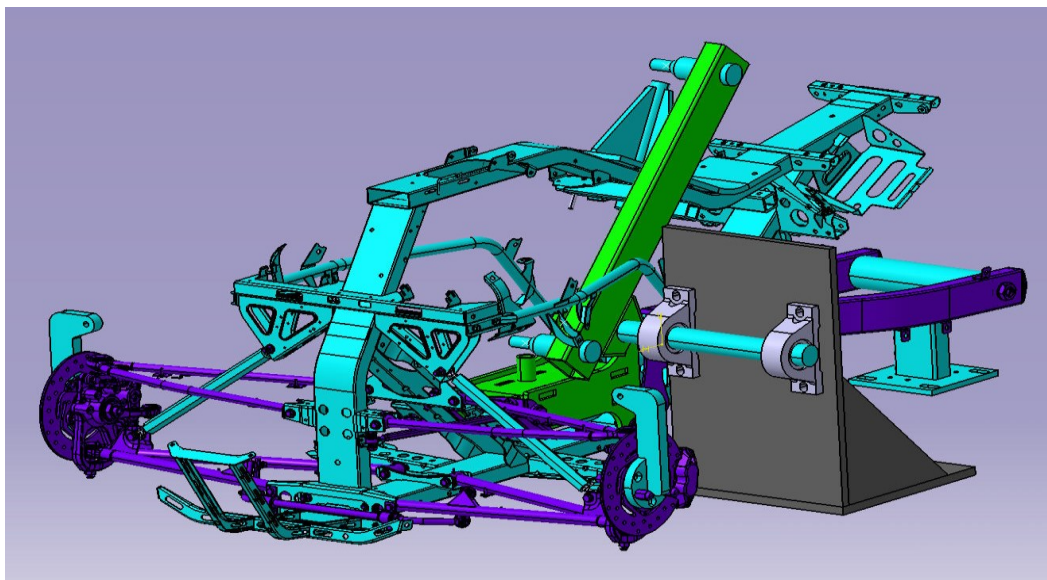


Figure 2.15: Gabarit du châssis Roadster

Les essais expérimentaux permettent aussi de choisir une solution technologique en fournissant des informations plus précises que l'analyse par éléments finis. Le choix du procédé d'assemblage pour le châssis en aluminium n'est pas effectué ; plusieurs procédés sont en compétition. L'analyse par éléments finis, ne pouvant donner d'information fiable en termes de contraintes au niveau des joints des différents modèles, hybride, soudé et riveté, ne permet pas de faire un choix. L'objectif de ces essais est d'offrir des éléments de comparaison entre les différents procédés d'assemblage.

Avant de pouvoir réaliser des essais sur le joint, il est nécessaire de concevoir un gabarit permettant de recréer les sollicitations de flexion et de torsion qui apparaissent dans le châssis lors du freinage et des virages. Une des principales difficultés est la conception d'un gabarit permettant de solliciter l'assemblage avec des contraintes identiques aux contraintes théoriques. La figure 2.18 présente le gabarit utilisé pour le châssis en aluminium du Roadster.

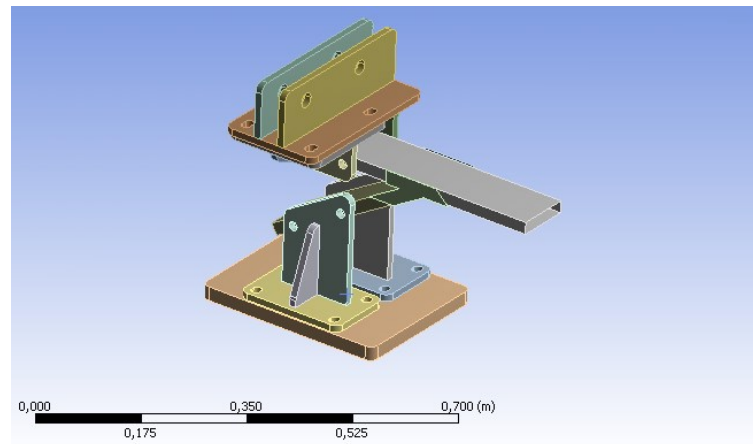


Figure 2.16: Exemple de Gabarit pour le joint arrière du châssis Roadster

Afin d'offrir des éléments de comparaison, plusieurs essais vont être planifiés. Un premier essai en statique va être réalisé afin d'atteindre la rupture du joint. Cet essai consiste à monter le joint avec son gabarit sur le banc d'essai et d'augmenter l'effort du vérin jusqu'à atteindre la rupture. Le comportement du joint au cours de l'essai sera observé et la valeur de la force de vérin au moment de la rupture sera relevée.

Le deuxième essai est un essai en fatigue. Un spectre de chargement est défini à l'aide d'un parcours dans la ville de Sherbrooke et la force du vérin est définie par un modèle par éléments finis. Le joint sur le gabarit est monté sur le banc d'essai, des jauges de déformation sont positionnées sur les zones dont on veut obtenir les valeurs de contraintes, des jauges de déplacement sont également placées. Ces outils de mesure vont permettre d'obtenir la valeur des contraintes et des déplacements. L'essai va se poursuivre jusqu'à la rupture du joint ou au nombre de cycles correspondant à la durée de vie souhaitée.

## CHAPITRE 3. Méthodologie

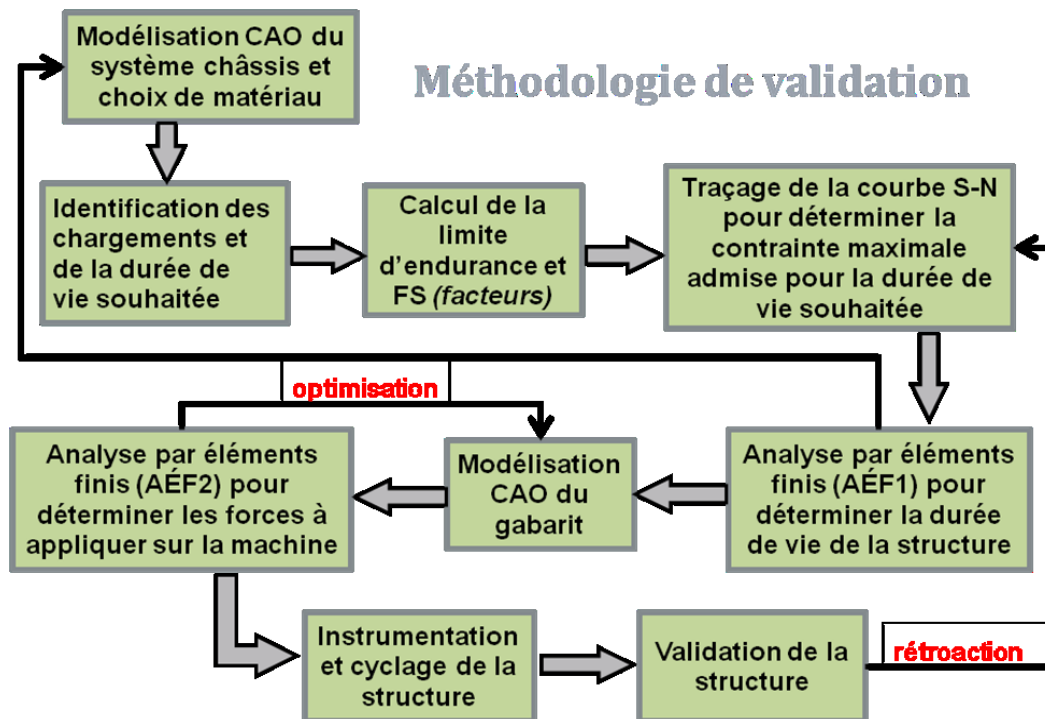
### 3.1. Stratégie générale

L'objectif principal consiste à évaluer *le comportement en fatigue d'un joint soudé d'un véhicule récréatif*, il paraît évident qu'il est nécessaire de réaliser une étude approfondie sur un joint provenant de ce véhicule dont un essai de fatigue. L'étude portera sur deux concepts de châssis différents : un châssis en aluminium et l'autre en acier. L'étude portera sur la caractérisation des propriétés d'un cordon de soudure en aluminium et la validation de la tenue en fatigue d'un joint soudé. Afin de limiter le sujet, un joint présent sur le châssis sera sélectionné pour être étudié. Lors de la conception du châssis en aluminium, de nouvelles questions ont été posées en ce qui concerne l'impact des procédés d'assemblage sur les caractéristiques des matériaux. Ainsi, des choix technologiques ont dû être faits, et certaines réponses à ces questions se trouvent dans ce document. Il a été notamment question du cintrage d'un profilé en aluminium 6061T6, d'une poutre à inertie variable selon la longueur.

Le chapitre présent va présenter les différentes méthodologies mises en place pour répondre efficacement aux critères de conception mentionnés à la section 2.3., Certaines d'entre elles sont inspirées d'ouvrages, ou du travail de mes prédécesseurs, d'autres ont été adaptées par mes soins au cas qui nous intéresse. On s'intéressera tout d'abord à la stratégie générale déployée pour permettre la validation d'une structure en fatigue. Cette section présentera la méthodologie mise en place par C. Iorga (26) pour la validation en fatigue d'un châssis et la méthodologie générale à mettre en place pour concevoir et valider un joint assemblé d'un châssis.

Ce chapitre abordera aussi la présentation du joint choisi pour l'étude, le choix de l'alliage, la méthodologie de choix et d'optimisation des procédés d'assemblage développé par Y. Mogenot (1), la méthodologie de caractérisation d'un joint soudé et sa modélisation.

La méthodologie développée dans ce document est inspirée de celle de C. Iorga, figure 3.1. Pour obtenir le détail de cette méthodologie le lecteur est invité à consulter la thèse de C. Iorga. (26) Celle-ci se base sur une modélisation par éléments finis du châssis et sur une méthode que l'on peut classer dans celles des contraintes nominales puisqu'elle utilise la courbe S-N. Une des limitations de cette méthodologie globale de conception et de validation est qu'elle ne couvre pas d'une manière spécifique la complexité des zones d'assemblage. La conception de ces zones soudées est présentée dans la section sur la modélisation. Les essais réalisés en août 2012 sur le châssis en acier permettent de valider cette méthodologie mais il est à noter que la zone de rupture du châssis n'a pas été correctement prédite.



1

Figure 3.1: Méthodologie de validation de châssis (26)

La méthodologie présentée ci-dessus ne prend nullement en compte la géométrie et les caractéristiques des joints. C'est pour cela qu'une méthodologie plus spécifique a été développée spécialement pour l'étude de ces points.

La première étape de la méthodologie illustrée dans la figure 3.2 est dédiée au recensement et à la sélection des procédés d'assemblage pour la conception de châssis dans le domaine des



transports. Ce travail a été réalisé en grande partie par Y. Mogenot. (1) La deuxième étape consiste à caractériser les procédés; il s'agit de déterminer leurs propriétés, leurs caractéristiques et l'impact de ces procédés d'assemblage sur la structure. Certains de ces procédés sont donnés dans ce document. Les deux premières étapes concernent le recueil des informations sur les procédés existants.

Les prochaines étapes de la méthodologie concernent l'étude des procédés appliqués au châssis. La troisième étape de la méthodologie consiste en l'identification de l'ensemble des joints du châssis. Cette étape permettra de déterminer les caractéristiques géométriques et mécaniques que devront satisfaire les procédés d'assemblage. Cette étape permettra aussi d'identifier le joint critique, le joint qui subit la plus grande sollicitation.

La quatrième étape est l'analyse numérique et la caractérisation expérimentale en fatigue de joints rivetés et soudés. L'étape précédente a permis de repérer la géométrie du joint critique. Plusieurs versions de ce joint vont être développées par CAO (conception assistée par ordinateur); des versions soudées et rivetées. Plusieurs géométries seront développées pour chaque version, soudage court, soudage long soudage en T, etc. Ces joints seront dans un premier temps analysés par éléments finis. Cette analyse permettra une comparaison des joints. Pour les géométries de joint présentant les meilleures caractéristiques, une caractérisation expérimentale sera réalisée. Elle permettra d'observer le comportement du joint et choisir le joint soudé et le joint riveté avec le comportement optimal.

La cinquième étape est l'optimisation géométrique des joints pour présenter les meilleures caractéristiques en fatigue.

La sixième étape est le choix du joint en fonction de critères tel que le coût de fabrication, l'assemblage, la rigidité et la valeur des contraintes et leur distribution.

La dernière étape est l'application du procédé retenu à l'ensemble des joints du châssis. Le type de procédé sélectionné dans les étapes précédentes va être appliqué au châssis en entier. Cette étape nécessite un travail de conception sur l'ensemble des joints du châssis pour appliquer le

procédé. On peut rajouter à cette étape la caractérisation en fatigue de l'ensemble du châssis en suivant la méthodologie de validation présentée dans ce document, figure 3.2.

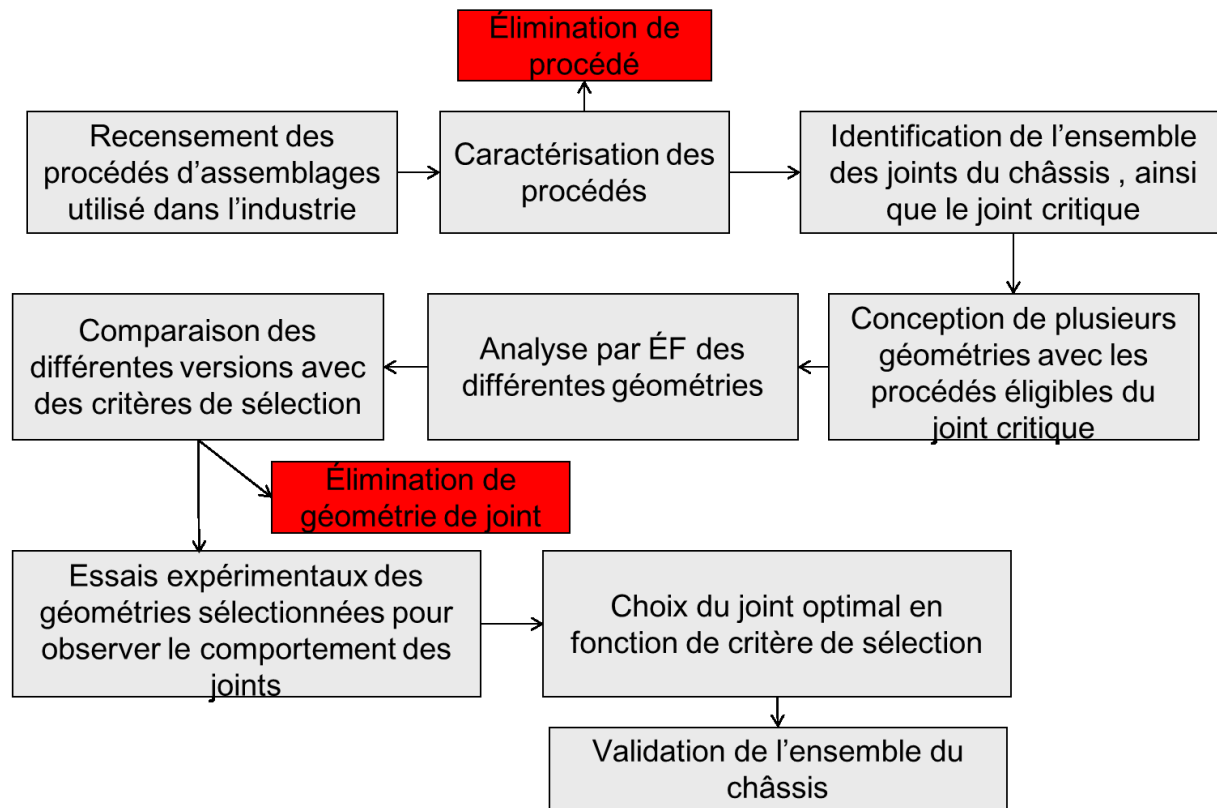


Figure 3.2: Schéma de la méthodologie d'étude d'un joint assemblé

### 3.2. Alliages utilisés dans le contexte de validation de la géométrie du joint

Le choix du matériau a un impact important sur la tenue et le comportement en fatigue de l'assemblage. Les différents guides de conception n'ont été réalisés que pour certaines classes de matériaux, en particulier les aciers. Les guides concernant l'aluminium sont rares et les entreprises gardent jalousement les résultats des tests réalisés sur ce matériau. Le choix s'est porté sur un alliage 6061T6 pour ses caractéristiques mécaniques très élevées, équivalente voir supérieure à celle de l'acier utilisé pour le châssis du Roadster. L'alliage 6061T6 présente des difficultés au pliage ; certaines géométries de supports présentent des rayons de pliage que ne peut atteindre le 6061T6 et il est donc nécessaire de choisir un autre alliage pour réaliser ces

supports. Le choix se porte sur le 5052H32 puisque ce matériau présente des caractéristiques mécaniques intéressantes, notamment en fatigue, et il est disponible sous forme de tôle. Les caractéristiques de ces matériaux sont présentées aux figures 3.3 et 3.4.

Les détails du choix du matériau sont indiqués dans le mémoire de Y. Mogenot (1).

Caractéristiques du 6061T6	Valeur
Limite élastique	270 MPa
Limite ultime	310 MPa
Valeur de contrainte maximale assurant la tenue en fatigue du véhicule	185 MPa

Caractéristiques du 5052H32	Valeur
Limite élastique	195 MPa
Limite ultime	230 MPa
Valeur de contrainte maximale assurant la tenue en fatigue du véhicule	140 MPa

Figure 3.3 : Caractéristiques mécaniques des différents alliages

Alliage	Épaisseur de tôle			
	0.5 à 1.5 mm	1.5 à 3 mm	3 à 6 mm	6 à 12.5 mm
6061 T4	1 e	1.5 e	3 e	4 e
6061 T6	2.5 e	3.5 e	4 e	5 e

	Épaisseur de tôle			
	0.5 à 1.5 mm	1.5 à 3 mm	3 à 6 mm	6 à 12.5 mm
5052 H32	1 e	1.5 e	1.5 e	2.5 e

Figure 3.4 : Rayon de pliage en fonction de l'épaisseur (e)

L'application des différentes méthodologies présentées dans cette section a été effectuée sur une partie restreinte du châssis par manque de temps pour réaliser une étude complète. La partie du châssis jugée la plus pertinente par la simplicité de sa géométrie et par ses différents types de sollicitations en usage courant est le joint arrière du châssis; zone d'assemblage entre la poutre supérieure et la poutre inférieure. Ce joint est illustré à la figure 3.5. Même si globalement la géométrie du châssis a subi de nombreuses modifications au cours de l'étude, la configuration

du joint arrière est celle qui est restée la plus stable (voir la section 4.1). Ce sous-assemblage a une géométrie assez simple et il est sollicité en torsion et en flexion avec des valeurs assez importantes. Il est à noter cependant que ce n'est pas la zone d'assemblage présentant les plus fortes sollicitations sur le châssis. L'assemblage se compose de deux poutres en aluminium 6061-T6 de profilé 4x2 pouces avec une épaisseur des parois de 0.125 pouces et de deux supports en feuille en 5052-H32. Ces différentes parties sont assemblées à l'aide de soudure en filet unilatéral.

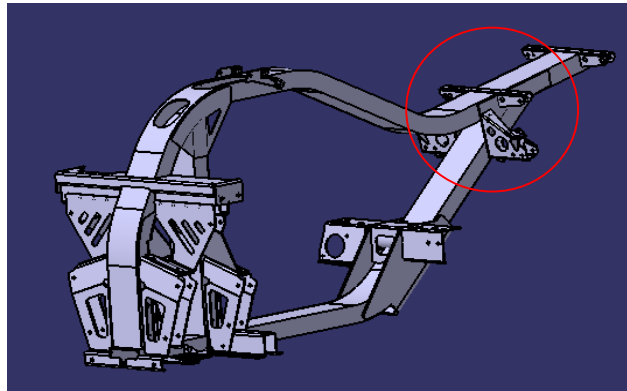


Figure 3.5:Présentation de la zone étudiée sur le concept 9 du châssis en aluminium

### 3.3. Méthodologie pour choix des procédés d'assemblage

L'état de l'art a montré qu'il existait de nombreux procédés d'assemblage et la difficulté de choisir le procédé optimal. Le choix du procédé d'assemblage aura un impact important sur le comportement du châssis. Une stratégie est développée par Y. Mogenot (1) pour sélectionner ce procédé d'assemblage; il a employé une méthode systématique permettant de n'omettre aucune solution. Cette stratégie se divise en quatre étapes principales, figure 26 :

- Recensement des techniques via une étude bibliographique;
- Évaluation des différents procédés d'assemblage à l'aide de modèles numériques;
- Analyse du rapport entre le poids et le coût de fabrication afin de vérifier si les critères économiques sont respectés ;
- Choix du procédé qui présente le meilleur compromis.

La méthodologie est détaillée de façon précise dans la référence (1).

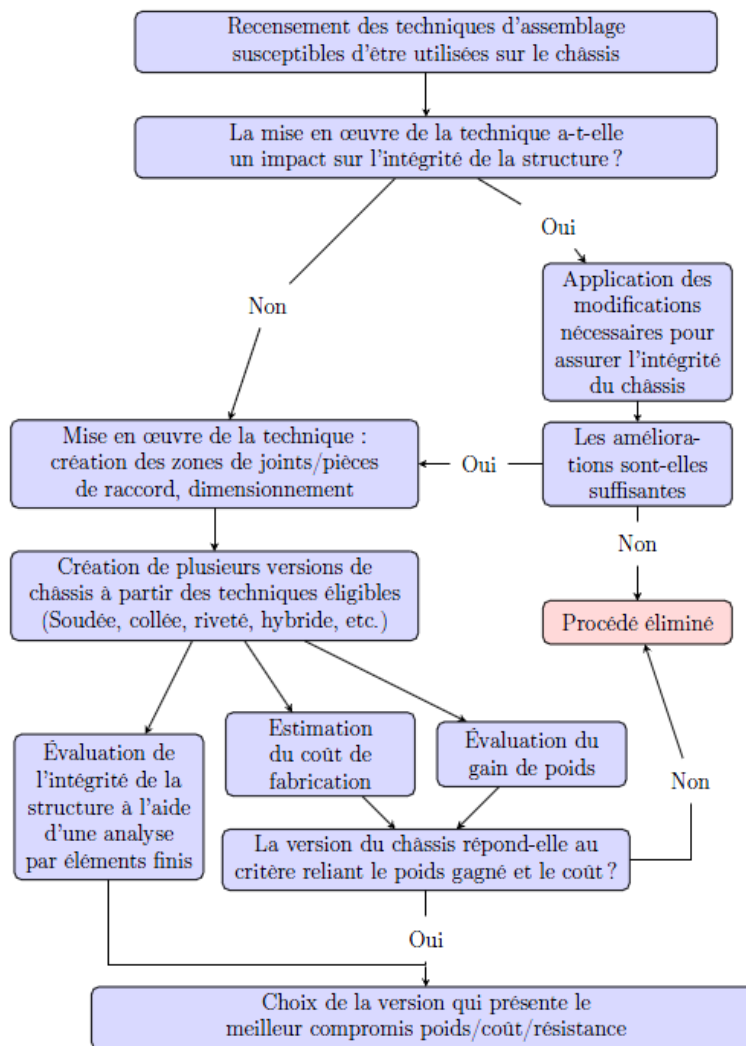


Figure 3.6 : Méthodologie de choix de procédé d'assemblage (1)

Cette méthodologie a été employée dans le cadre du projet à l'étape d'analyse des procédés, le résultat est présenté dans la section 4.2.

### 3.4. Méthodologie d'étude des joints et modélisation numérique

Les étapes de la méthodologie générale qui a été utilisée afin d'étudier les joints d'un châssis sont présentées à la section 3.1. Cette section présente plus en détail les différentes étapes de la méthodologie d'étude d'un joint. Comme il est mentionné à plusieurs reprises dans ce document, les joints sont les zones les plus critiques d'un assemblage et il est nécessaire de les étudier d'une façon plus approfondie. Par conséquent, le développement d'une méthodologie plus spécifique de conception et de validation, devient incontournable. On présentera tout d'abord la

méthodologie générale applicable à tout type de procédé d'assemblage, pour ensuite l'appliquer à un procédé d'assemblage : le soudage. Cette méthodologie est appliquée dans le chapitre 5 de ce document.

L'objectif est de créer une méthodologie permettant de valider la tenue en fatigue d'un châssis de véhicule récréatif, basée sur l'évaluation de l'impact du procédé d'assemblage sur le matériau et sur l'étude d'un joint isolé. Cette méthodologie implique également des études expérimentales et numériques.

Avant de détailler précisément la méthodologie mise en place, on expliquera la place de plus en plus importante prise par les études numériques dans le cadre de la conception et de la validation de produits. L'intérêt premier d'utiliser un modèle numérique est de réduire au minimum les essais expérimentaux coûteux en temps et en argent. Cependant, les modèles numériques actuellement utilisés au CTA pour étudier les assemblages ne fournissent pas de résultats précis. En conséquence, il sera nécessaire soit de développer un modèle numérique plus complexe ou de se baser sur des essais expérimentaux.

La méthodologie se basera sur une approche pyramidale couramment utilisée dans les départements de recherche et développement (figure 3.7). Cette approche consiste à complexifier les études à chaque palier, l'étude du palier  $n$  fournissant des données au palier  $n+1$ . Dans notre cas, la pyramide dispose de 3 paliers, soit un premier palier correspondant à l'étude d'éprouvettes, un second palier consistant en l'étude de joints provenant du châssis et un dernier palier correspondant à la validation du châssis complet par un essai en fatigue.

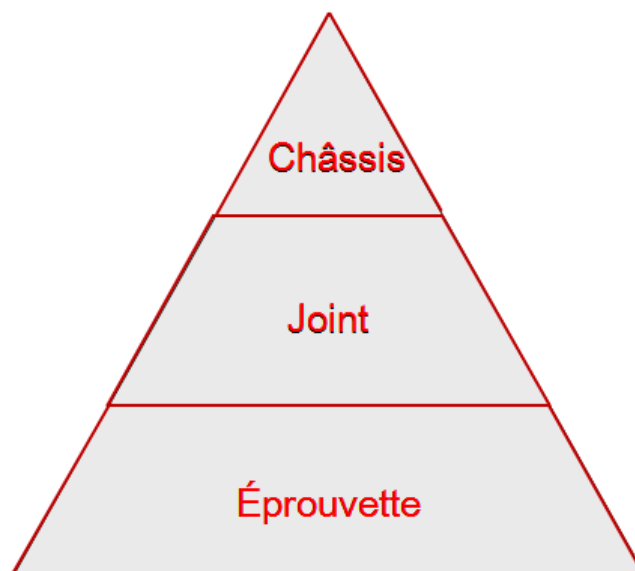


Figure 3.7: Méthodologie en pyramide

### **1er palier**

L'étude des éprouvettes est nécessaire pour déterminer les caractéristiques mécaniques du ou des matériaux du châssis, les caractéristiques utiles dans la plupart des cas sont la résistance élastique, la résistance ultime, le module de Young et l'allongement à la rupture. Ces résultats sont obtenus à l'aide d'essais de traction uni axiaux.

L'impact du procédé d'assemblage sur les caractéristiques du métal de base est aussi estimé, le procédé d'assemblage ayant été appliqué sur une éprouvette (pose d'un cordon de soudure, rivetage de l'éprouvette...). Celle-ci est ensuite soumise à un essai de traction uni axial. La comparaison des résultats provenant des éprouvettes « saines » et des éprouvettes assemblées par soudage permet de déterminer l'influence du procédé. D'autres tests peuvent être prévus selon les caractéristiques à être évaluées.

Dans le cas du soudage, cette étude permet d'obtenir l'étendue de la ZAT et les caractéristiques mécaniques associées à cette zone.

Des essais de fatigue peuvent être réalisés sur les éprouvettes afin de déterminer les valeurs de résistance à la fatigue et de l'impact du procédé d'assemblage sur cette caractéristique.

Les données de sortie de ce premier palier sont les valeurs de la résistance élastique, la limite ultime et la résistance en fatigue du métal « sain » et influencé par le procédé d'assemblage.

### **2<sup>ème</sup> palier**

Le 2<sup>ème</sup> palier s'intéresse à l'étude locale de joints existant sur le châssis. L'objectif de cette étape est de valider la géométrie conçue pour le joint soumis à un chargement réel. Le seul moyen de valider une structure est de réaliser un essai de fatigue sur un banc d'essai. Afin de limiter le nombre d'essais expérimentaux, la géométrie du joint est dans un premier temps étudiée dans le modèle numérique du châssis en entier. Le modèle numérique prend en considération les données fournies par les essais du 1<sup>er</sup> palier. Cependant la complexité de la géométrie de la structure entraînerait un modèle numérique avec maillage fin au niveau des zones d'assemblages. Afin de réduire le temps d'étude il a été décidé d'étudier les joints de façon locale.

Le joint étudié est modélisé à l'aide d'un logiciel de CAO, et la maquette numérique qui en résulte est exportée dans un logiciel d'analyse par éléments finis. L'étude locale du joint nécessite de concevoir un gabarit afin de reproduire les sollicitations réelles sur le joint. Le joint sera ensuite testé sur un banc d'essais à l'aide du gabarit. L'essai de fatigue reprendra le chargement et le spectre réel.

Il n'est pas possible en termes de temps et de coûts d'étudier tous les joints du châssis, il est donc nécessaire de choisir les joints à partir des valeurs de contraintes calculées à la phase d'identification des chargements.

Donnée d'entrée : Caractéristique mécanique du métal sain et du métal influencé par le procédé d'assemblage

Donnée de sortie : Validation de la géométrie du joint à l'aide d'un essai de fatigue

### **3<sup>ème</sup> palier**



Le 3<sup>ème</sup> palier représente la validation du châssis en entier par un essai de fatigue reproduisant les sollicitations auxquelles est soumis le véhicule au cours de son fonctionnement. Le palier 2 permet de valider les joints les plus sollicités tandis que le palier 3 est la dernière étape de validation du châssis. Si le châssis passe correctement ce palier, il sera apte à être utilisé sur le véhicule, tout en respectant les critères mécaniques imposés durant son développement.

Donnée d'entrée : Validation des géométries de joints provenant du palier 2 et informations sur l'impact des procédés d'assemblage sur le matériau provenant du palier 1.

Donnée de sortie : Validation du châssis entier



## CHAPITRE 4. Application au châssis du Roadster

### 4.1. Présentation de l'évolution de la géométrie du châssis

La géométrie du châssis a connu de nombreuses modifications lors du développement du projet. Les premiers modèles développés par M. Mogenot prennent en compte uniquement les critères de fatigue et de masse et non celui de rigidité. On peut constater une évolution de la géométrie des supports permettant de rigidifier l'ensemble. L'ajout d'un deuxième critère mécanique a entraîné une évolution profonde de la géométrie.

Certains choix technologiques ayant un impact sur la géométrie ont été posés très tardivement. Cette prise de décision tardive a empêché de travailler sur la conception précise des supports du Roadster. En attendant la forme finale de la géométrie du Roadster, l'étude s'est d'abord portée sur la caractérisation du soudage du 6061-T6 ainsi que sur le développement d'un modèle numérique voulu au maximum prédictif.

Chaque géométrie est marquée par son créateur, chaque concepteur ayant une approche différente. Jusqu'à présent, quatre concepteurs différents principaux ont travaillé sur le design du châssis au niveau de la tenue en rigidité et en fatigue, classés par ordre chronologique, M. Tacher, Y. Mogenot, C. Iorga. Les modèles développés par Y. Mogenot et M. Tacher ne prennent en compte que le critère de fatigue et l'emplacement géométriques des différentes pièces composant le Roadster. Les modèles développés par C. Iorga et F. Daoust prennent en compte tous les critères et leur modèle le plus abouti sera le prochain châssis du Roadster électrique avec châssis en aluminium. La figure 28 présente les différentes géométries du châssis.

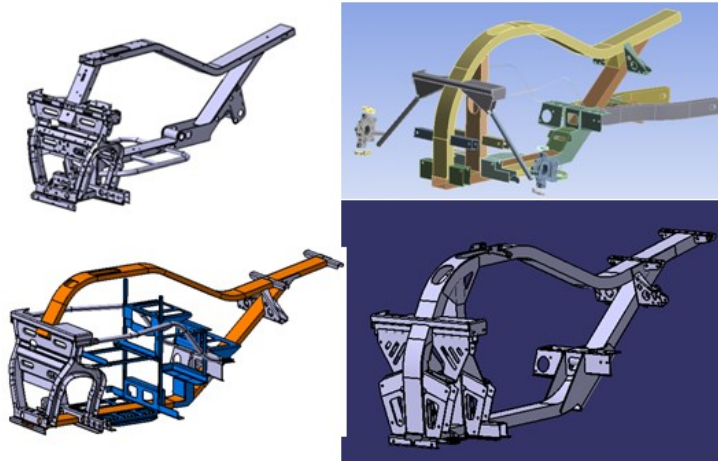


Figure 4.1: Présentation des différentes géométries du châssis, de haut en bas de gauche à droite, châssis Roadster 2009 (acier), version en aluminium développé par Mogenot, version aluminium développé par Iorga, dernière version actuelle

Après avoir développé la méthodologie d'étude et de validation des joints (section 3.4), on peut l'appliquer au cas d'un joint soudé. Il a été décidé de réaliser l'étude sur un joint inspiré du châssis car la géométrie du châssis change régulièrement en fonction des décisions technologiques de l'entreprise et des membres du projet. La géométrie du joint est présentée dans la suite de ce document.

En suivant la méthodologie, les premiers essais sont réalisés sur des éprouvettes afin de déterminer l'impact d'une soudure sur le matériau et les caractéristiques mécaniques du métal dans son état sain et soudé (voir les sections 4.1 à 4.3). Ces résultats permettront de mieux connaître l'influence d'un cordon de soudure sur l'alliage 6061T6 et d'obtenir les valeurs de résistance élastique et mécanique du matériau au niveau des zones soudées. Ces résultats seront utilisés pour affiner l'analyse des résultats obtenus par éléments finis.

La deuxième série d'essais est réalisée sur un joint étudié de façon locale (section 4.4), elle utilisera les résultats issus des essais précédents. Ils seront réalisés sur un joint en acier pour valider la méthodologie et sur des joints en aluminium. Ces essais ont pour objectif de valider la géométrie d'un joint via des études expérimentales à l'aide de gabarits ainsi que d'estimer la

véracité des résultats des modèles numériques développés en comparant les résultats expérimentaux aux résultats numériques.

La section 4.5 s'intéresse à la validation de la tenue en fatigue d'une poutre cintrée par une étude en fatigue expérimentale.

## 4.2. Choix du procédé d'assemblage

De nombreux procédés d'assemblage ont été envisagés pour le châssis. Ces procédés d'assemblages ont été décrits dans le chapitre sur l'état de l'art ainsi que dans le mémoire de Y. Mogenot (1). Il a été décidé d'utiliser le procédé de soudage pour différentes raisons :

- Le rivetage apporte un surplus de poids par rapport au soudage et on recherche à obtenir un châssis allégé au maximum
- Le soudage est adapté à une production en série.
- Le procédé de soudage des alliages d'aluminium est moins maîtrisé et indiqué pour un travail de recherche

## 4.3. Étude éprouvette

La section 4.3.1 présente la mise en place de la première étape de la méthodologie développée dans la section 3.3.

Ces essais ont pour but de déterminer certaines caractéristiques des cordons de soudure telles que la résistance élastique, la résistance à la rupture et le module de Young ainsi que le comportement des joints à la rupture. Ces études ont permis aussi d'évaluer l'étendue de la ZAT et son comportement. Plusieurs tests ont été réalisés sur des éprouvettes normalisées afin d'éliminer un maximum de variables et afin de pouvoir comparer ces résultats expérimentaux à des résultats issus de la littérature.

Le soudage entraîne un changement thermique modifiant la microstructure du matériau et introduisant des contraintes résiduelles. Cette modification engendre un comportement différent

de celui du matériau de base, surtout dans le cas de la tenue en fatigue (zone affectée thermiquement ou ZAT).

#### 4.3.1. Éprouvette en métal de base

L'essai de traction est réalisé selon la norme NF EN 10002 afin de vérifier les propriétés mécaniques du matériau de base. On vérifiera notamment le comportement statique à l'aide de la courbe contrainte-déformation et la dureté à l'aide d'un test de micro dureté. Ce test sera réalisé sur une machine de traction de type INSTRON, figure 4.2. Dans le cas d'un essai sur éprouvette de traction uni-axiale, les paramètres à fixer sont les suivants : la fréquence, la température, la forme géométrique de l'échantillon, la fixation de l'échantillon au vérin. La fréquence a généralement peu d'effet sur les résultats (34). Les seules limitations posées par une fréquence trop élevée sont une augmentation de la température de la pièce et le temps de réponse des appareils de mesure et de la machine de traction elle-même. Les éprouvettes sont fixées au banc à l'aide de mors concentriques.



Figure 4.2: Machine de traction statique

Le choix de la géométrie de l'éprouvette est important, elle est normalisée afin de pouvoir comparer les résultats obtenus. Les éprouvettes sont plates, de section rectangulaire et de forme en haltère. Les dimensions sont présentées dans la figure 4.3.

Il se pose ensuite la question du nombre d'échantillons. A cause de la nature statistique du phénomène de la fatigue, il est important de réaliser plusieurs essais et d'effectuer une analyse statistique des résultats pour déterminer des courbes d'équiprobabilité de rupture (35) (36). Plus le test est complexe, plus il faut s'attendre à une dispersion des résultats importante; les guides

d'essais préconisent de tester de 6 à 12 échantillons pour des travaux de recherche, mais ce nombre monte jusqu'à 24 éprouvettes pour le développement de courbes de conception établies à partir de données fiables (37) (34).

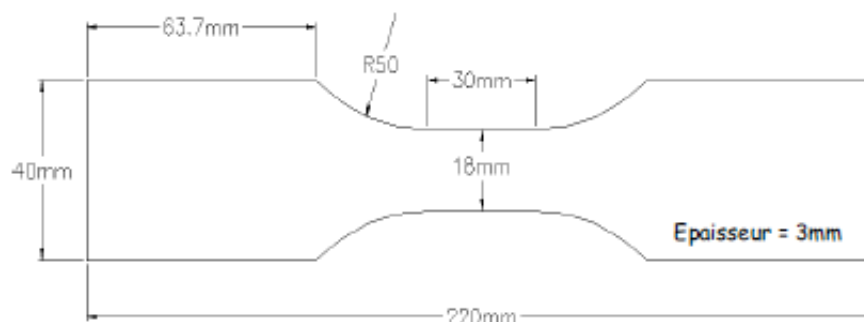


Figure 4.3: Dimensions de l'éprouvette haltère utilisée dans l'essai de traction

Un exemple de courbe contrainte-déformation obtenue lors de ces essais est présenté à la figure 4.4. Les essais ont été réalisés à une vitesse de traverse de 10 mm/min. Pour obtenir les résultats les plus justes possibles, trois essais ont été réalisés pour atténuer les effets d'éventuels défauts présents dans les éprouvettes. Les valeurs moyennes calculées à partir de ces trois essais sont fournies dans le tableau suivant.

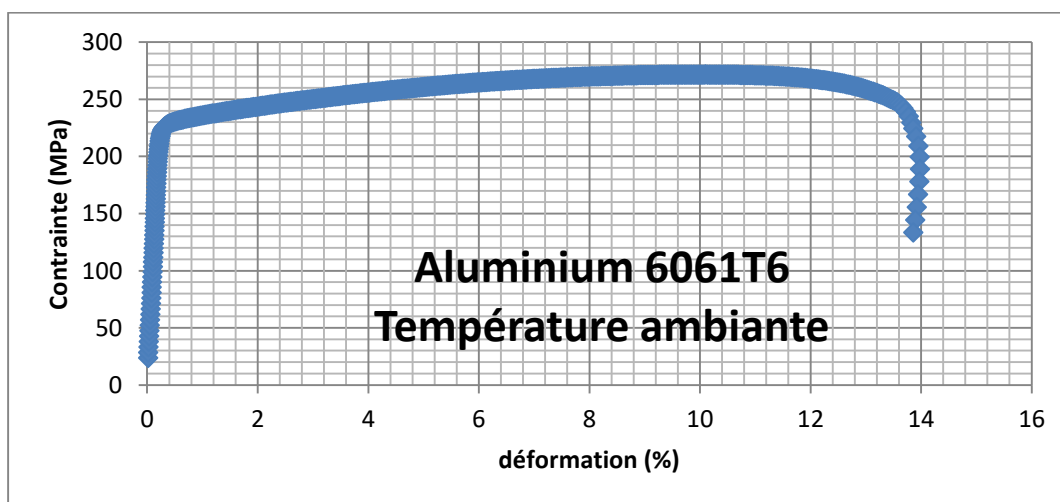


Figure 4.4: Loi de comportement statique du 6061T6

Les valeurs obtenues par ces essais, disponibles au tableau 3, sont conformes aux caractéristiques mécaniques fournies par la littérature. Afin de déterminer les propriétés mécaniques et la loi de comportement de la soudure, des essais ont été réalisés sur des

éprouvettes présentant un cordon de soudure. Cette première série d'essais a permis de fournir des résultats de référence pour le métal sain qu'on pourra comparer aux résultats provenant des essais sur les échantillons soudés. On pourra ainsi estimer les effets du soudage sur les caractéristiques du matériau. Les valeurs du module de Young du tableau 4.1 est arrondi au dixième près.

Tableau 4.1: Caractéristiques de l'alliage 6061T6

Caractéristiques	Re (MPa)	Rm (MPa)	E (GPa)	Allongement à rupture (%)
<b>6061T6 expérimental (valeur moyenne)</b>	240	275	69	14
<b>Éprouvette 1</b>	242	278	69.1	14.3
<b>Éprouvette 2</b>	238	271	68.9	13.9
<b>Éprouvette 3</b>	240	276	69	13.8
<b>Écart type</b>	4.62	15	0.01	0.08
<b>6061T6 Théorique (Valeur moyenne)</b>	276	310	68.9	15
<b>6061 T6 Valeur mesurée</b>	240±4.62	275±15	69±0.01	14±0.08
<b>Écart absolu entre valeur théorique et expérimentale</b>	13%	11%	0.1%	6.7%

On constate un écart absolu maximal de 13%. La valeur mesurée est en dehors du domaine d'incertitude pour Re, Rm et A%. En supposant que ces valeurs suivent une distribution normale, on constate que la valeur mesurée de Re se situe à 7.8 fois l'écart type, Rm se situe à deux fois l'écart type (il y a 5% qu'un écart soit supérieur ou égale à 2 fois l'écart type). Dans le cadre de Rm on peut considérer que la mesure est valable mais néanmoins pas suffisante



La littérature indique que la résistance élastique minimale est de 240 MPa et la résistance à la rupture minimale est de 300 MPa pour qu'un alliage d'aluminium porte la nomination 6061T6 (38). La majorité des alliages possèdent une résistance plus élevée comme indiqué dans la section 2.3 mais ces valeurs minimales peuvent être trouvées. En prenant en compte ces nouvelles valeurs, on constate que  $R_e$  se situe dans son domaine d'incertitude.

L'erreur sur la valeur  $R_m$  peut provenir d'erreurs systématiques que l'on va tenter d'estimer.

Sources d'erreur :

- Position et maintien de l'extensomètre sur l'éprouvette. L'extensomètre à un entraxe de 30 mm entre ses deux broches de maintien ce qui correspond à la longueur de l'éprouvette entre les deux congés. Estimation de l'erreur : 2%.
- Qualité de l'usinage de l'éprouvette. Les éprouvettes ont été usinées au laser par une compagnie extérieure au CTA. Le choix s'est porté sur une découpe au laser afin d'éviter le phénomène d'écrouissage sur les bords du a une découpe mécanique. Cependant certaines amorces de découpe au laser ont été réalisées dans la partie située entre les deux congés malgré la notification que ces zones devaient rester saines. Estimation de l'erreur : 10%.
- Étalonnage de l'extensomètre. Estimation de l'erreur : négligeable.

## Conclusion

Cet essai a permis de déterminer les caractéristiques mécaniques de l'aluminium 6061T6 à l'aide de la courbe contrainte-déformation. Cette courbe pourra être utilisée par la suite dans le modèle numérique afin de modéliser le comportement plastique du matériau (voir la section 4.6).

### 4.3.2. Éprouvette soudée

Pour examiner l'influence du cordon de soudure, un cordon de soudure a été placé de façon transversale sur l'éprouvette. La forme et les dimensions de l'éprouvette sont les mêmes que celle pour la section 4.3.1. La figure 4.5 présente une éprouvette montée sur la machine de traction.



Figure 4.5 : Dispositif expérimental

On peut fabriquer deux types d'éprouvettes soudées de référence, une éprouvette soudée avec un cordon de soudure longitudinale et une éprouvette soudée bout à bout. Dans le premier cas la soudure est parallèle à la charge, dans le second cas la charge est perpendiculaire à la charge appliquée. Le choix de l'éprouvette dépend du mode de chargement de la structure réelle. La figure 4.6 présente le joint installé dans le gabarit de test et son chargement. On constate que la poutre est soumise principalement à un chargement en flexion et en torsion ce qui entraîne des contraintes normales selon l'axe de la poutre. Pour le cordon de soudure 1 on constate que le chargement est parallèle au cordon de soudure. Par contre pour les cordons de soudure 2 les contraintes seront perpendiculaires aux cordons. La géométrie au niveau des cordons de soudure présente des zones de concentration de contrainte le risque d'amorce de fissure est plus important dans cette zone. Il est donc décidé de choisir une éprouvette soudée bout à bout afin d'évaluer les caractéristiques mécaniques dans cette zone.

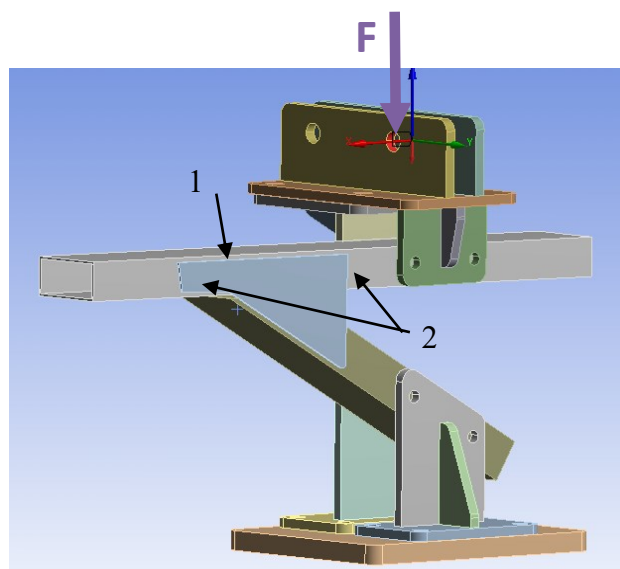


Figure 4.6: Chargement du joint

Les éprouvettes ont été sectionnées en deux et un cordon de soudure a ensuite été déposé pour assembler l'éprouvette (figure 4.7). Différents types de cordons de soudure ont été testés : un cordon de soudure présentant une pénétration totale, une pénétration partielle et un dernier présentant un espacement de 1 mm entre les deux parties de l'éprouvette. L'importance de la pénétration sur la tenue en fatigue d'un joint a déjà été présentée à la section 2.4.



Figure 4.7: Éprouvette soudée de traction

Les résultats obtenus par cet essai sont présentés dans le tableau 4.2. Nous constatons une baisse de toutes les caractéristiques mécaniques, telles que l'allongement, la résistance élastique, ou la limite ultime. Les baisses des caractéristiques sont très importantes, si on compare ces résultats aux résultats provenant d'essais sur une soudure longitudinale sur des cordons en acier

(39), on constate que la baisse concernant que l'allongement; la résistance élastique est la même tandis qu'on observe une augmentation de la limite ultime. Les résultats expérimentaux sont présentés sur la figure 4.10 et le tableau 4.2. Les données statistiques sont fournies par le tableau 4.3. On constate que l'écart type est important pour les différents paramètres mesurés ce qui révèle une forte disparité des caractéristiques mécaniques des éprouvettes.

Une explication pouvant expliquer cette différence est le procédé de fabrication. Ce procédé entraîne d'importants défauts géométriques dus au démarrage et à l'arrêt du cordon de soudure. En effet on a pu observer au cours des essais de traction que la rupture intervenait toujours en bout de cordon de soudure. Cette zone de rupture est présentée sur la figure 4.7 au niveau du cercle rouge. L'amorçage de fissure a lieu au niveau du pied de cordon de soudure. La figure 4.8 présente le point de rupture au niveau de la flèche noire et la direction e la fissure avec le trait pointillé rouge. On peut observer que la forme du cordon de soudure, en arc de cercle, crée une zone de concentration de contrainte et c'est à cet endroit que la fissure s'amorce.

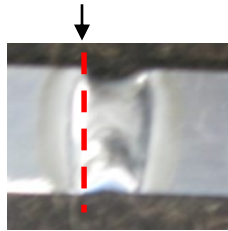


Figure 4.8 : Cordon de soudure

Afin d'obtenir des résultats plus précis et justes, un nouveau procédé de fabrication doit être employé. Il serait nécessaire de déposer les cordons de soudure sur une plaque et ensuite de découper les éprouvettes en évitant les zones de démarrage et d'arrêt du cordon.

L'essai suivant a été réalisé sur 6 éprouvettes pour chacun des 3 cas.

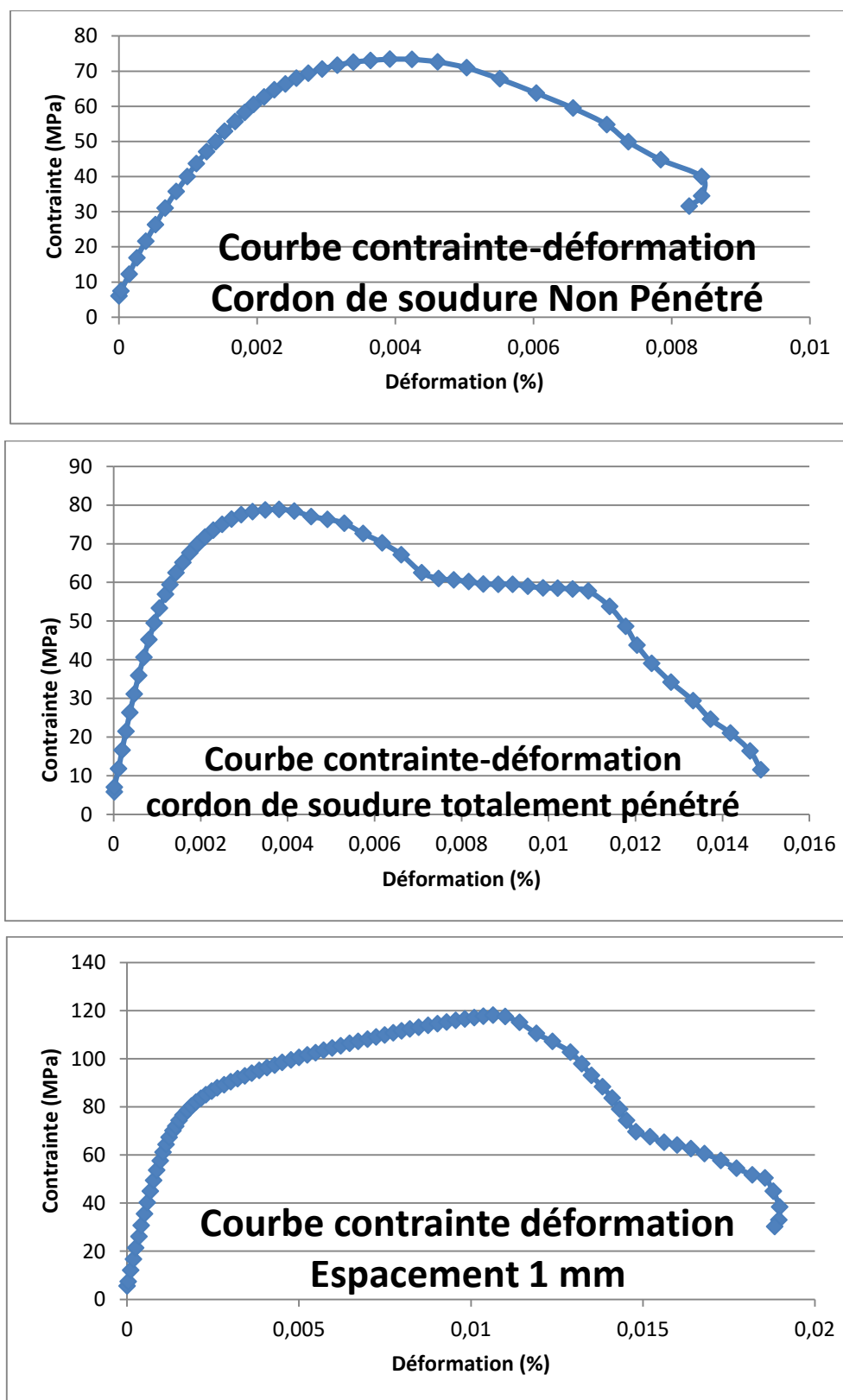


Figure 4.9: Loi de comportement des joints soudés

Tableau 4.2:Caractéristiques mécaniques de la soudure (valeur moyenne sur les 6 éprouvettes)

Caractéristiques	Re (MPa)	Rm (MPa)	E (GPa)	Allongement à rupture
Éprouvette cordon de soudure à pénétration partielle	53±4.6	73.5±5.3	45±1.7	0.008±0
Éprouvette cordon de soudure à pénétration totale	65±6.8	81.2±3.6	55±4.9	0.015±0
Éprouvette espacement 1 mm	80±10.3	120.6±15.3	64±3.5	0.019±0

Tableau 4.3 : Écart type et étendu des mesures effectuées sur les éprouvettes

	Pénétration partielle		Pénétration totale		Espacement 1 mm	
	étendu	écart type	étendu	écart type	étendu	écart type
<b>Re (MPa)</b>	13	4.6	20	6.8	30	10.3
<b>Rm (MPa)</b>	17	5.3	11	3.6	50	15.3
<b>E (GPa)</b>	5.5	1.7	15	4.9	9	3.5
<b>Allongement à la rupture</b>	0.003	0.0	0.003	0.0	0.01	0.0

La figure 4.10 présente la baisse des caractéristiques mécaniques des éprouvettes soudées en prenant comme référence les résultats de l'essai sur l'éprouvette saine. On constate une baisse très importante des caractéristiques mécanique, de l'ordre de 70% pour la résistance ultime et élastique. Dans la littérature (25), pour un soudage bout à bout (identique à l'essai réalisé) la résistance élastique est de 140 MPa et la résistance à la rupture est de 165 MPa. On constate que toutes les valeurs mesurées sont en dehors du domaine d'incertitude. L'erreur provient d'une erreur systématique que l'on tente de déterminer.

Source d'erreur :

- Position et maintien de l'extensomètre (identique à la section 4.3.1) Estimation erreur : négligeable
- Géométrie du cordon de soudure (détaillé à la section 4.3.2). L'erreur provient de ce paramètre qui entraîne une forte erreur systématique qui fausse les résultats.

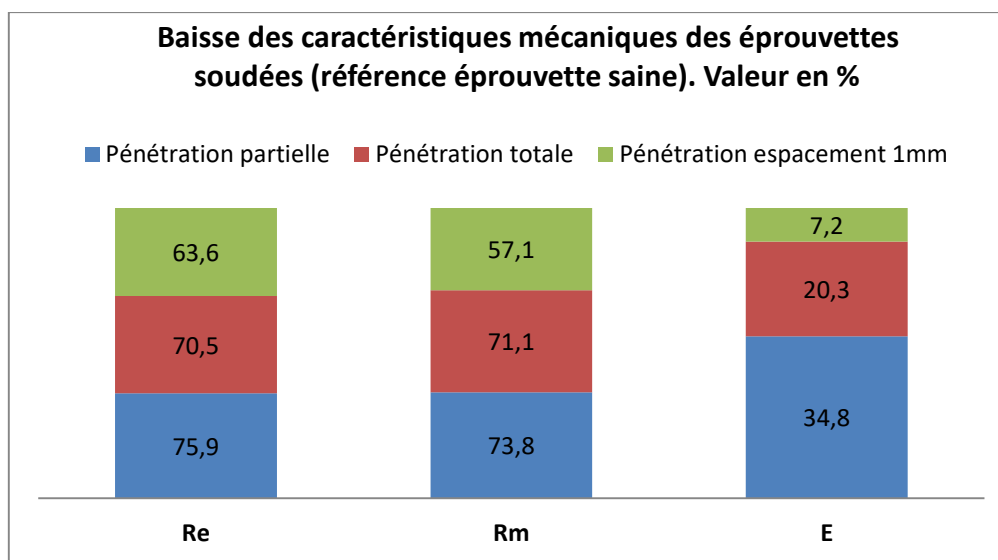


Figure 4.10: Baisse des caractéristiques mécaniques des éprouvettes soudées

On peut constater que plus la pénétration est importante, plus les caractéristiques sont élevées. Sur la figure 4.10, on peut observer que l'éprouvette présentant la pénétration la plus importante (en vert) voit ses caractéristiques subir la baisse la plus faible.

### Conclusion :

Ces essais avaient pour premier objectif d'évaluer l'impact d'un cordon de soudure sur les caractéristiques mécaniques de base, en faisant la comparaison de ces résultats et de ceux de la section précédente. Le défaut lors de la fabrication empêche cette comparaison, mais les résultats présentés permettent de faire une corrélation entre pénétration du cordon de soudure et caractéristiques mécaniques. La littérature (25) indique pour des soudures bout à bout une résistance élastique de 140 MPa et une résistance mécanique de 165 MPa. Ces valeurs seront utilisées par la suite.

#### 4.3.3. Essai de dureté

La dureté d'un métal correspond à son aptitude à résister à la pénétration. Plusieurs ouvrages font référence à un lien entre la dureté et les caractéristiques mécaniques du matériau ; un changement de la valeur de la dureté implique un changement des propriétés du matériau. Une baisse de cette dureté correspondant le plus souvent à une baisse de ses propriétés. L'objectif de

cet essai est de déterminer l'étendue de la zone affectée thermiquement causée par le soudage ; on connaîtra ainsi l'étendue de la zone où il y a un changement de propriété mécanique.

La méthode de mesure de dureté employée est la dureté Brinell (HRB). C'est un essai de pénétration mécanique et le pénétrateur est une bille en acier trempé polie. La valeur de dureté Rockwell est mesurée à l'aide de la pénétration rémanente laissée par le pénétrateur sur lequel on applique une faible charge. Les duretés des couches superficielles peuvent différer des duretés à cœur. C'est pourquoi des duretés superficielles ne coïncident pas avec celles mesurées sous fortes charges. Il est donc nécessaire, lors de tests de dureté, d'indiquer le chargement. L'appareil utilisé pour ce test est de modèle Instron 3000. Il permet de mesurer la dureté Brinell sous une charge de 500 à 1000N.

On sait qu'on peut diviser en trois zones le métal autour du cordon de soudure ; le métal de base (MB), la zone affectée thermiquement et la zone fondue (ZF). Chacune de ces zones possède des propriétés mécaniques différentes. Ainsi, connaître l'étendue de chacune de ces zones devient très important.

Les essais de dureté sont réalisés sur six échantillons différents car la soudure présente de grande disparité. Les valeurs de dureté seront relevées sur trois zones du cordon ; le début du cordon de soudure (apport de chaleur supérieur), la partie centrale du cordon et la fin du cordon de soudure (apport de chaleur important). Les points de mesure de dureté sont pris le long d'une ligne comme présentée à la figure 4.11 (les lignes sont numérotées de 1 à 3).

Le premier essai de dureté est réalisé sur un cordon entre deux plaques d'épaisseur 6mm. Le cordon de soudure est présenté à la figure 4.11.



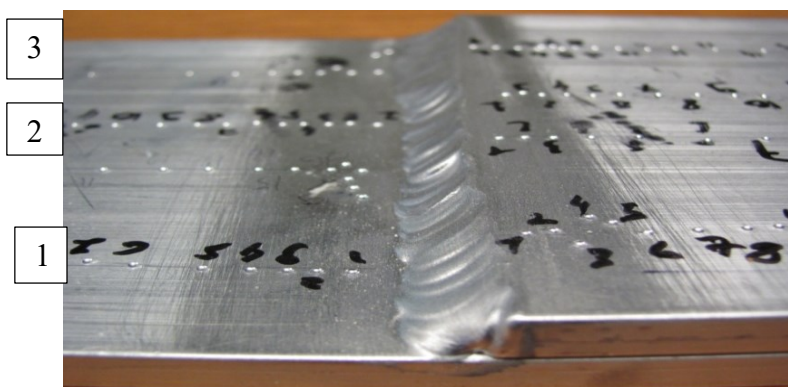


Figure 4.11 : Cordon de soudure, épaisseur 6 mm

Les trois graphiques, figure 4.12 à 4.14, présentent les valeurs moyenne de dureté obtenues au cours des essais sur les échantillons. La première mesure est réalisée au démarrage du cordon de soudure, la deuxième au milieu du cordon et la troisième à la fin du cordon de soudure.

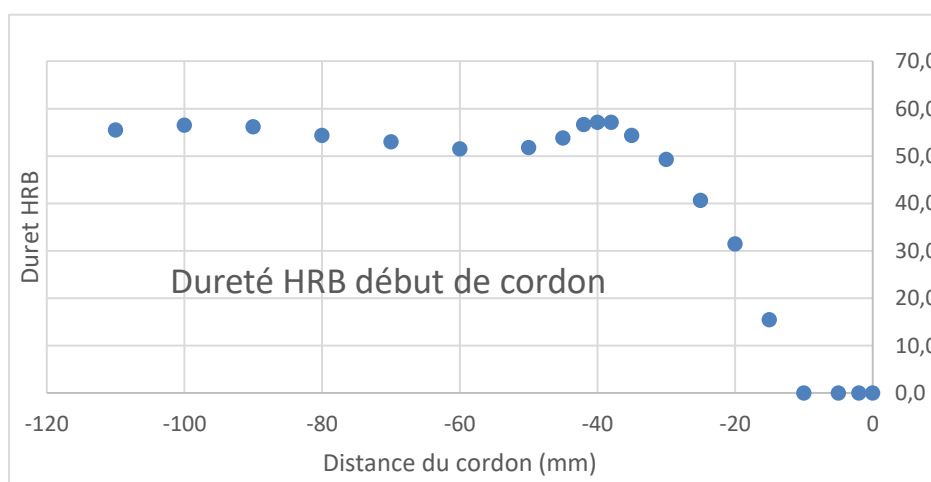


Figure 4.12: Dureté en début de cordon

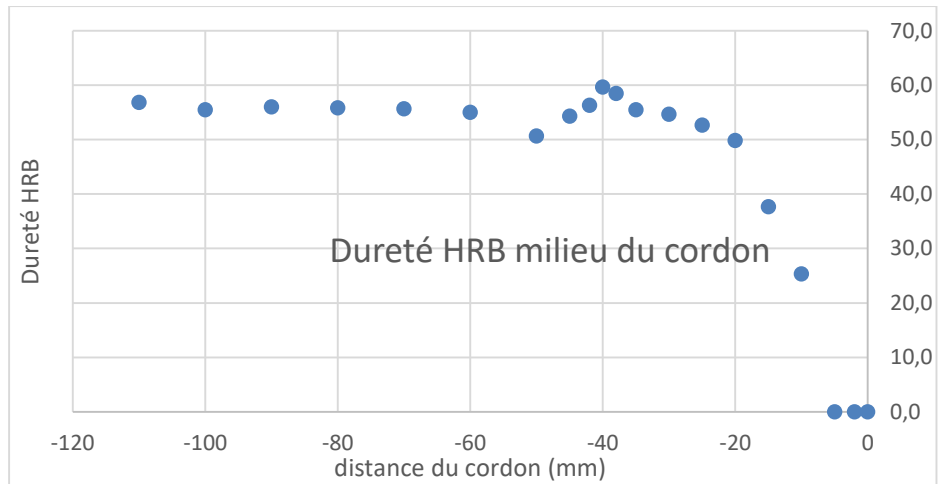


Figure 4.13: Dureté en milieu de cordon

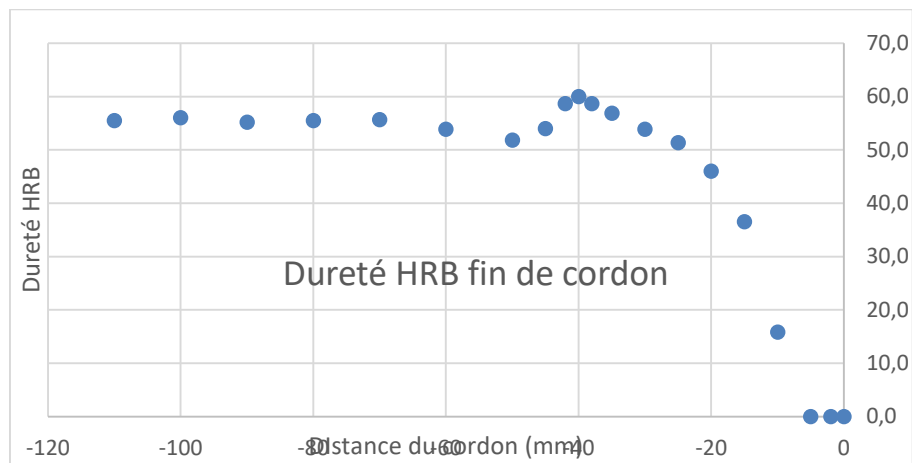


Figure 4.14: Dureté en fin de cordon

Les figures 4.15 et 4.16 présentent l'étendue et l'écart type pour chaque point de mesure de dureté pour les trois zones. On constate une étendu importante des résultats dans la zone affectée thermiquement, de même pour l'écart type. L'étendu et l'écart des résultats sont expliqués par la forte variabilité du soudage.

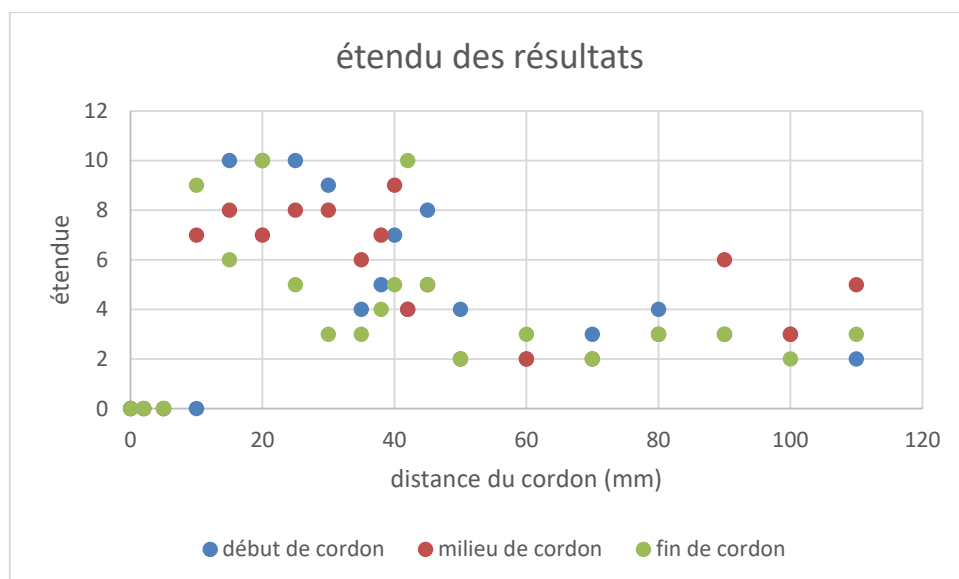


Figure 4.15: étendue des mesures de dureté

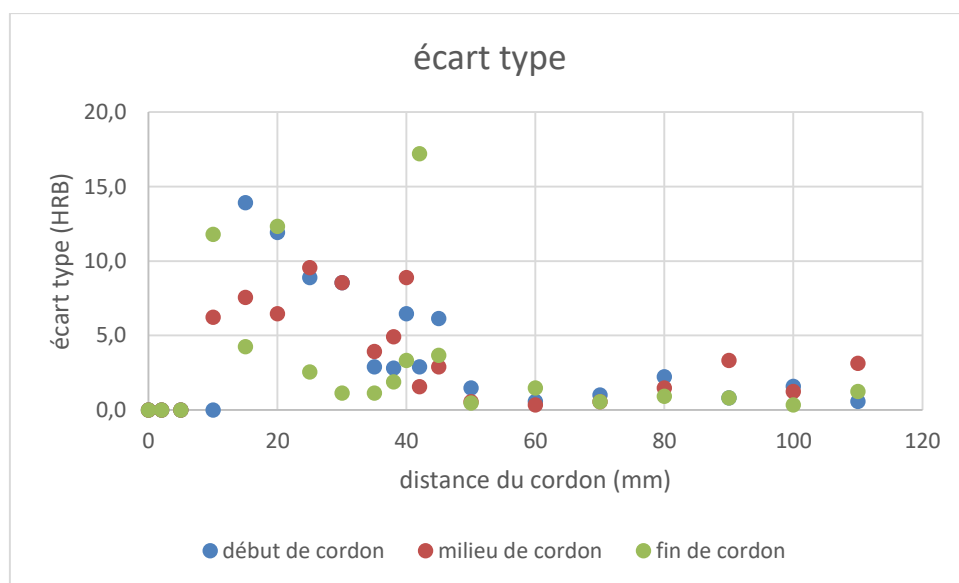


Figure 4.16: écart type des mesures de dureté

Le tableau 4.4 présente les résultats obtenues pour les 6 échantillons, la figure 4.17 présente une synthèse de l'étendue de la ZAT en fonction de la position du cordon :

Tableau 4.4 : Mesures de dureté pour une épaisseur de 6 mm

Zone	Zone fondue	ZAT	Métal de base
Dureté HRB	>10	De 30 à 60	55
Dimension (à partir du cordon) en mm	De 0 à 10	De 10 à 60	À partir de 60

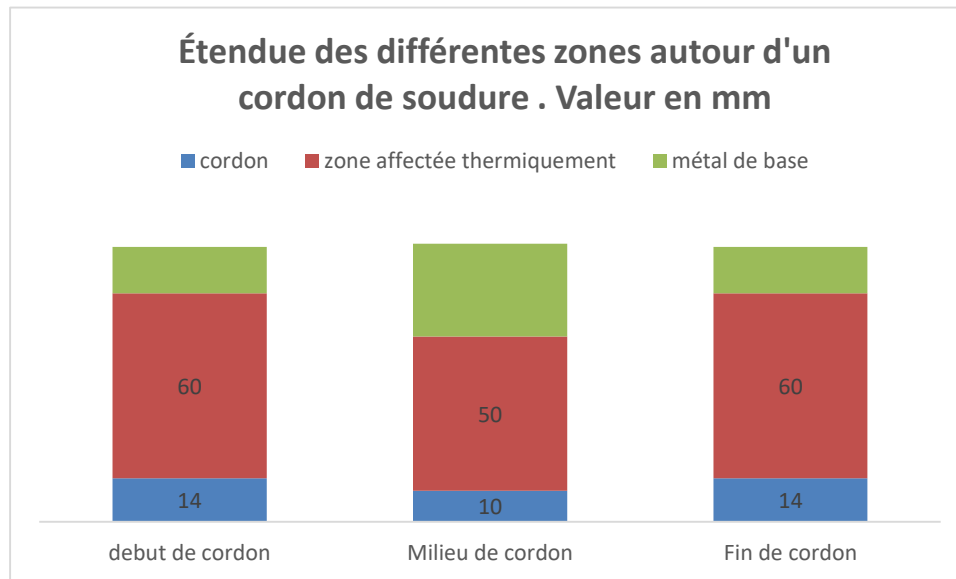


Figure 4.17: Étendue des différentes zones autour d'un cordon de soudure

On remarque que la moyenne de dureté varie d'une zone à l'autre. Sa valeur dans le métal de base est inférieure à celle dans la zone affectée thermiquement et supérieure à celle dans le cordon de soudure. On peut résumer les résultats sous la forme suivante :

$$HRB^{ZAT} > HRB^{MB} > HRB^{CORD}$$

L'explication de cette différence de dureté peut être expliquée par les transformations au niveau de la structure métallurgique, (40). La figure 4.18 présente la répartition des différentes zones sur un assemblage en T.

On constate aussi que la zone affectée thermiquement est plus étendue dans les zones de démarrage et de fin de cordon de soudure dû à l'apport supérieur de chaleur.

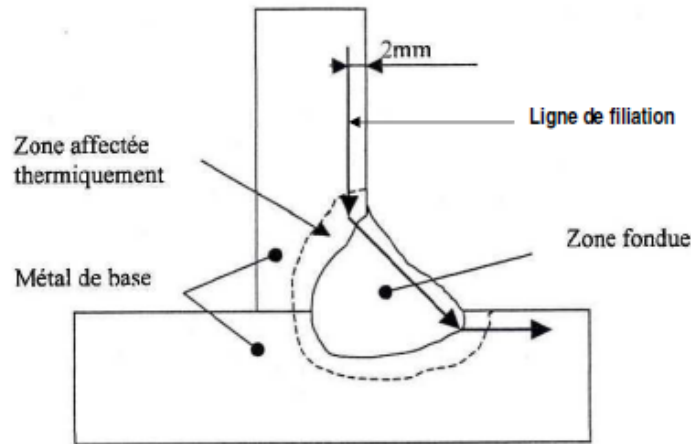


Figure 4.18 : Différentes zones du métal (40)

Source d'erreur :

- Étalonnage de l'appareil de mesure de dureté : Erreur négligeable
- Variation des points de mesure de dureté : Erreur estimée : 2%

### Conclusion :

Cet essai a permis de déterminer l'étendue de la zone affectée thermiquement. On pourra ainsi connaître la zone où les caractéristiques mécaniques sont abaissées et la prendre en compte dans le post traitement des données issues du modèle numérique.

### Conclusion de la première étape de la méthodologie

La première étape de la méthodologie a permis de déterminer l'impact d'un cordon de soudure sur les caractéristiques mécaniques de l'alliage d'aluminium. Les essais de tractions sur éprouvette permettent de connaître l'influence d'un cordon de soudure sur les caractéristiques mécaniques, les essais de dureté permettent de déterminer l'étendue de la ZAT. Ces données seront utilisées pour affiner le post traitement des modèles numériques. Cela permet de répondre au second objectif fixé dans la section 1.4.2.

## 4.4. Étude des joints

Cette section présente les essais de fatigue à amplitude constante réalisés au cours du projet. Les essais portent sur la géométrie présentée dans la section 3.2. L'objectif est de valider la

géométrie du joint arrière à la fatigue sous un chargement dit réel, correspondant au chargement que subit cette portion dans l'utilisation normale du véhicule.

Le premier essai a été réalisé sur un joint arrière d'un châssis en acier de Roadster pour mettre en place les différentes approches présentées dans ce document, soit les approches nominales et hot spot, section 2.6. Les autres essais seront réalisés sur une géométrie conçue pour la version aluminium. Les géométries des différents joints du châssis sont très différentes les unes des autres. Il n'est pas envisageable de réaliser des courbes S-N pour les différents types de géométrie.

Afin de recueillir les données des différents capteurs pendant les essais, un module d'acquisition de données de type e-DAQ a été utilisé (26).

Il est nécessaire de mettre en place un système de mesure pour évaluer le niveau de contrainte avec les différentes approches. Pour effectuer des mesures de déformation, de nombreuses méthodes de mesures de déplacement seront employées, dont les transformateurs différentiels linéaires variables et les jauges résistives. Les jauges résistives sont jugées plus précises et fiables et seront donc utilisées. Le fonctionnement des jauges résistives est parfaitement connu et maîtrisé, leur fonctionnement est détaillé dans (27). La donnée recherchée est la contrainte, et il devient donc nécessaire d'établir une relation fiable entre les contraintes et les déformations fournies par les jauges. La figure 4.19 présente la géométrie de la rosette.

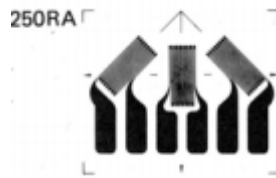


Figure 4.19: Jauges de déformations en rosette

La relation suivante (4-1) permet, à partir d'une déformation en fonction du temps, d'obtenir un spectre dans l'espace contrainte-déformation pour un chargement cyclique (41) (36).

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left( \frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} \quad (4-1)$$

où  $E$  est le module d'élasticité

$K'$  et  $n'$  sont les constantes de relation contrainte-déformation plastique

$\Delta\epsilon$  est l'amplitude de déformation locale

$\Delta\epsilon_e$  est l'amplitude de déformation élastique

$\Delta\epsilon_p$  est l'amplitude de déformation plastique

#### 4.4.1. Essai de fatigue sur le joint en acier

Le premier essai est réalisé sur le châssis acier du Roadster déjà éprouvé et au comportement connu. L'objectif de cet essai est de valider la méthodologie mise en place ainsi que le gabarit conçu. Il est nécessaire que le gabarit reproduise correctement les cas de chargement que subit le châssis en fonctionnement.

Le châssis est produit de façon industrielle, les cordons de soudure ayant été réalisés par des robots. L'échantillon est composé de deux poutres de section 4 par 1 pouce et de 0.125 pouces d'épaisseur en acier ASTM-A27, figure 4.20.

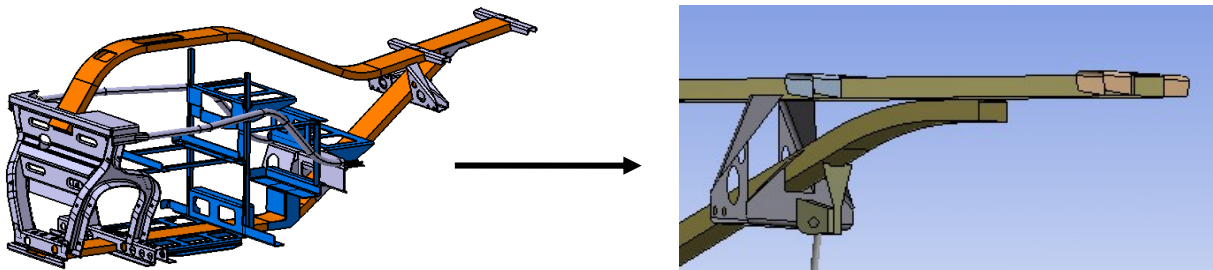


Figure 4.20 : Présentation du joint étudié

L'objectif d'un essai de fatigue est de valider la tenue de la structure soumise à un chargement qu'elle subirait dans sa vie. On cherche à valider que la structure ne présente pas d'amorce de fissure au cours de l'essai.

La réalisation de cet essai pose plusieurs questions qui sont l'instrumentalisation du joint, le choix du chargement, du spectre, la conception du gabarit.

Après le choix de la géométrie du joint à étudier, il est nécessaire de concevoir un gabarit qui reproduit les sollicitations réelles. « L'étude expérimentale du comportement en fatigue d'un

matériau exige qu'on dispose de moyens d'essais qui permettent de reproduire les efforts réels auxquels ce matériau est soumis en service » (35). Ce gabarit est dans un premier temps conçu à l'aide d'un logiciel de CAO ; les sollicitations induites par ce gabarit sont évaluées à l'aide d'un logiciel de simulation par éléments finis.

Le gabarit conçu pour répondre à cette problématique est présenté ci-dessous, figure 4.21. Il est constitué de deux parties distinctes ; un premier ensemble (partie inférieure) permet de réaliser un encastrement entre la poutre inférieure et le support rattaché au tablier de la machine MTS. Le second ensemble (partie supérieure) est la pièce intermédiaire entre le vérin et la poutre. On peut constater que la pièce intermédiaire dispose de deux positions de fixation du vérin (une pour solliciter la poutre en torsion et l'autre en flexion).

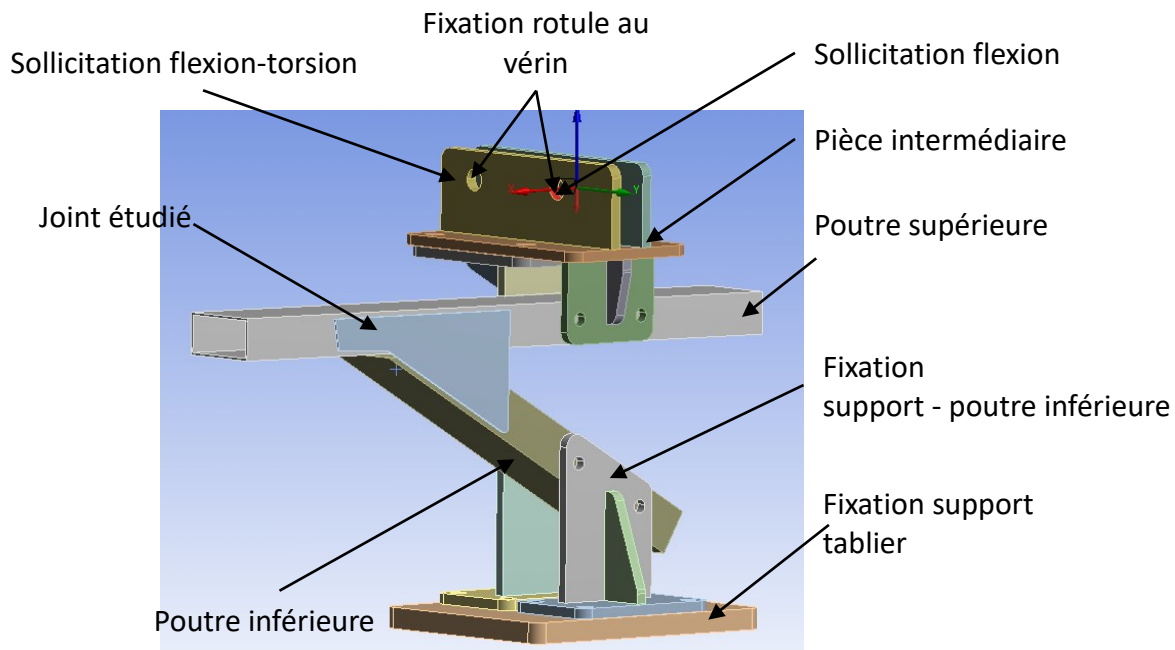


Figure 4.21: Présentation du gabarit

Ce modèle géométrique est ensuite transféré vers un logiciel d'analyse par éléments finis ; le logiciel utilisé est ANSYS. Cette étape permet de valider que la sollicitation correspond au chargement réel et déterminer les efforts à appliquer par le vérin en position flexion et torsion pour reproduire les mêmes valeurs de contrainte.



On modélise la liaison entre le gabarit et la table de la machine MTS par une liaison liée (encastrement) au niveau de la plaque de support. Les liaisons entre les différentes pièces du montage sont modélisées avec les liaisons qui conviennent (rivetage ou boulonnage contact surface-surface, soudage contact surface-ligne). Le chargement est appliqué au niveau des points de fixation de la rotule et comprend un cas de chargement pour la flexion et un pour la torsion. La méthodologie se base sur une comparaison entre les valeurs obtenues par le modèle du gabarit et le modèle du châssis entier. Les valeurs pour le modèle du châssis entier proviennent d'un modèle numérique développé par C. Iorga (26), figure 4.22. Dans ce modèle les joints ne sont pas modélisés géométriquement. Ils sont modélisés comme indiqué à la figure 4.56 de la section 4.6.

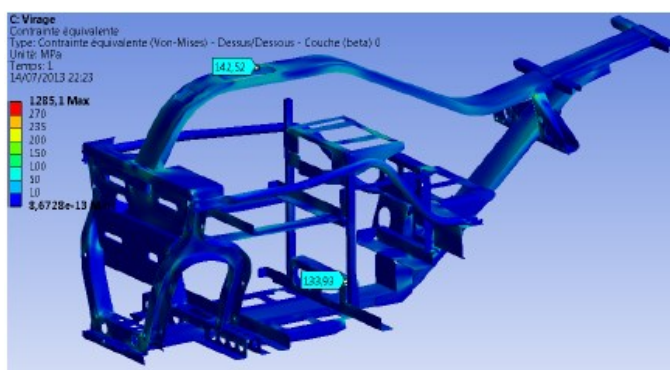


Figure 4.22: Distribution des contraintes sur le châssis entier

Deux types de chargements prédominant ont été identifiés par l'entreprise lors d'essais sur route. Un chargement sollicitant le châssis en flexion lors des phases de freinage et un chargement le sollicitant en une combinaison de torsion/flexion lors des phases de virage. Les valeurs des chargements ont été déterminées par une étude interne à l'entreprise (figure 4.23). Le modèle du châssis entier permet de modéliser parfaitement sa tenue dans des conditions réelles. En se basant sur les résultats de ce modèle, on validera le joint pour une utilisation classique du châssis.



Figure 4.23: Détermination des cas de chargement

Le spectre de chargement a été obtenu à partir d'essais sur route réalisés par C. Iorga ; un parcours a été établi dans la région de Sherbrooke respectant le type de route qu'un utilisateur de Roadster rencontre (autoroute, ville, campagne). Lors de ce parcours, le nombre de virage et de freinage rencontrés ont été comptabilisés. Ce nombre est équivalent à une durée de vie de 10 ans. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5: Spectre de chargement

	Freinage + dos d'âne	Virage	total	Fréquence (Hz)	Temps d'essai (s)	Temps d'essai (heure)	Temps d'essai (jour ouvert 9h-18H)	Temps en jours
Spectre l'un à la suite de l'autre	250000	175000	425000	1	425000	118.1	13.1	4.9

On compare la distribution des contraintes au niveau du joint arrière sur le châssis en acier et celle provenant du gabarit, figure 4.24.

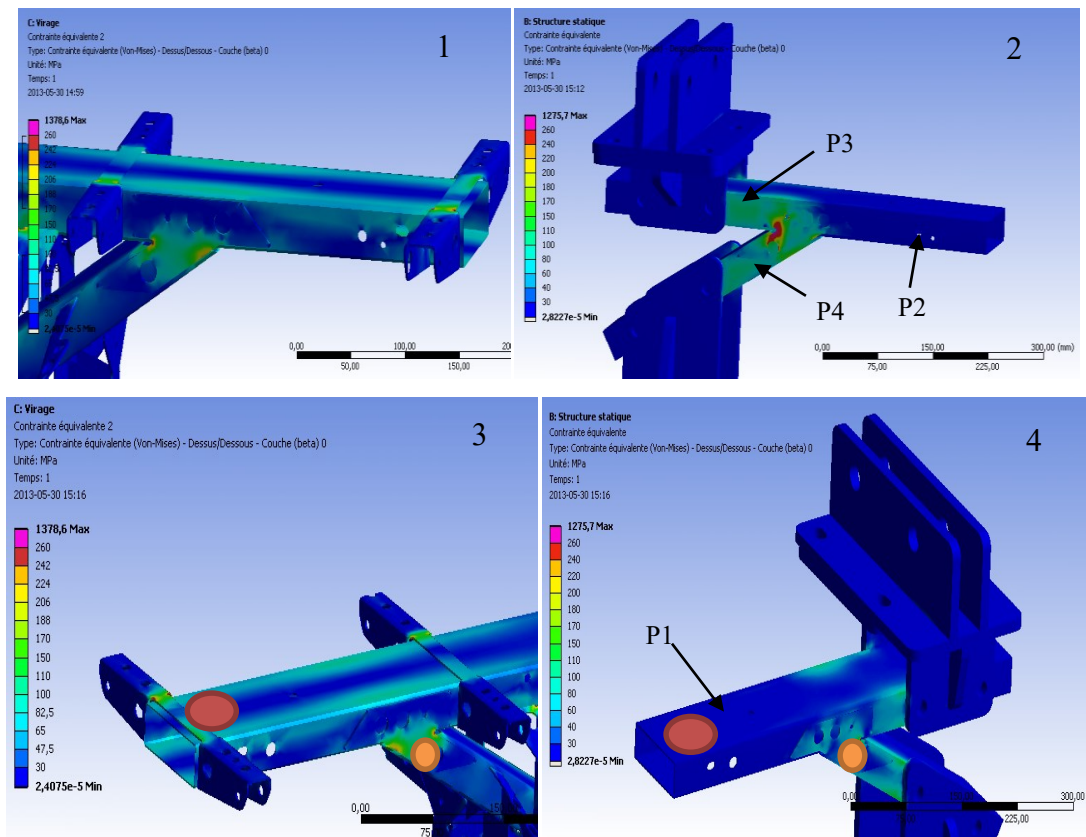


Figure 4.24 : Distribution des contraintes au niveau du joint arrière, en haut flexion et en bas torsion

On peut observer à gauche (vignettes numérotées 1 et 3) la distribution de contraintes sur le joint pris sur le châssis et à droite la distribution tirée du gabarit (vignettes numérotées 2 et 4). Le cas de chargement en flexion entraîne une sollicitation en flexion au niveau de la poutre supérieure et une combinaison flexion/torsion au niveau de la poutre inférieure. Le cas de chargement en torsion entraîne une sollicitation combinée de flexion et torsion au niveau des deux poutres.

On remarque que la distribution de contraintes est semblable au niveau du joint. Cependant dans les zones éloignées du joint (par exemple à l'extrémité de la poutre) on observe que la distribution de contraintes du châssis est plus sévère que celle du joint. Il suffit de vérifier que les valeurs de contraintes au niveau du modèle du joint et du modèle de châssis ne dépassent pas la résistance à la fatigue du matériau.

Il est nécessaire de relever les valeurs de contraintes en différents points du châssis pour valider correctement la distribution de contraintes. Dans la suite, on présentera quelques exemples de

prise de valeur ; une au niveau de l'extrémité de la poutre dans la partie opposée à la zone d'application d'effort et l'autre au niveau du joint. Lors de la validation du gabarit, dix prises de mesure ont été effectuées.

La figure 4.25 présente les valeurs de contraintes au niveau de la face supérieure de la poutre supérieure en flexion et en torsion ; zone rouge sur la figure 4.24. On observe que la distribution de contraintes est plus sévère sur le modèle du châssis. Cependant la contrainte ne dépasse pas la valeur de la résistance en fatigue de l'acier.

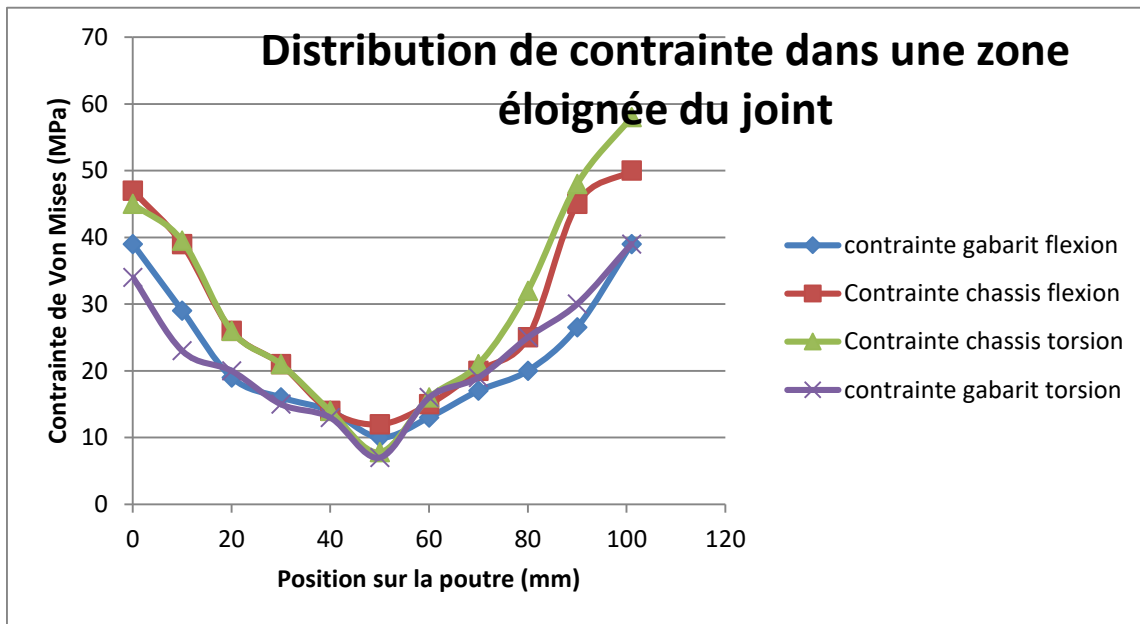


Figure 4.25: Distribution de contrainte dans un point éloigné du joint

La figure 4.26 présente les valeurs de contraintes au niveau du joint ; zone orange sur la figure 4.24. Le relevé des valeurs de contraintes est effectué le long des supports. On observe que le niveau de contraintes est plus sévère sur le joint que sur le modèle du châssis entier. Le joint a subi une augmentation de la contrainte maximale dans le cas de la flexion de 12.3% et dans le cas de la torsion de 9.83%.

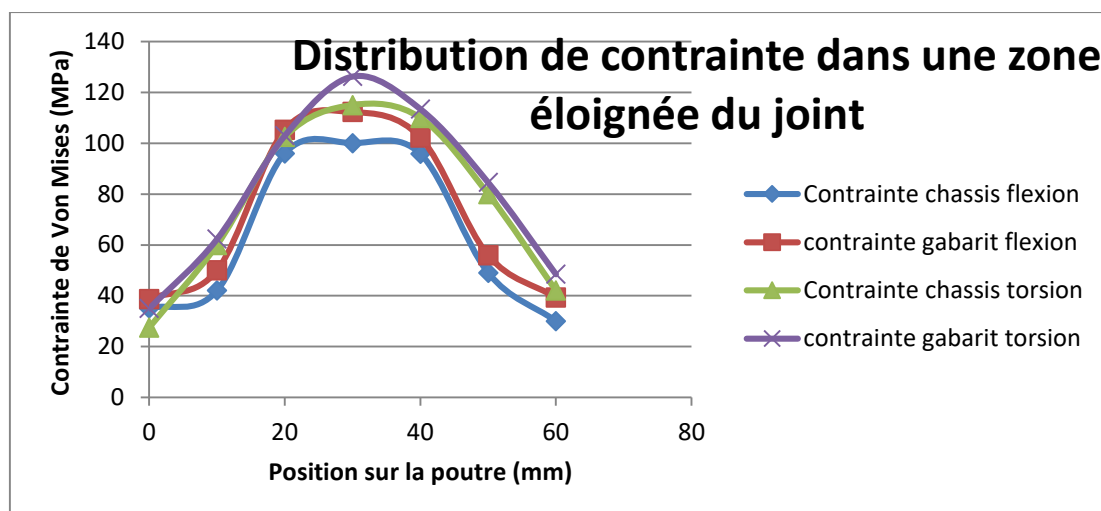


Figure 4.26: Distribution de contrainte au niveau du joint

Le modèle numérique valide le gabarit en termes de sollicitations et de contraintes. Il est maintenant nécessaire de déterminer les efforts à appliquer au niveau du vérin pour reproduire les valeurs de contraintes présentes sur le châssis entier. Les facteurs suivants sont reconnus pour avoir une influence significative sur la durée vie en service : géométrie, facteur d'échelle, qualité de fabrication des échantillons, désalignement des spécimens, fréquence d'application des charges, température et environnement, séquence de chargement des spectres. (27)

Même si la sollicitation produite par le gabarit est semblable, elle n'est pas parfaitement identique ; la valeur de contraintes ne sera donc pas identique sur les deux modèles. Pour déterminer la valeur d'effort des vérins, on relèvera sur plusieurs points du modèle numérique du châssis, les valeurs de contrainte équivalente. Ces points seront choisis sur des zones éloignées des concentrations de contraintes telles que les cordons de soudure et les formes géométriques particulières. En faisant varier la valeur de l'effort appliqué par les vérins, on cherchera à atteindre ces valeurs sur le modèle numérique du gabarit. Les résultats sont fournis dans les tableaux 4.6 et 4.7.

Tableau 4.6: Valeur des contraintes selon différents points de mesure (figure 4.24) dans le cas d'un chargement en virage

Points de mesure	Contrainte modèle numérique châssis (MPa)	Contrainte dû à un effort de 1200N (MPa)	Contrainte dû à un effort de 1600N (MPa)
P1	10.7	8.5	9.5
P2	55	24	58.9
P3	85	38	88.3
P4	190	85	184

Tableau 4.7: Valeur des contraintes selon différents points de mesure dans le cas d'un chargement en freinage

Points de mesure	Contrainte modèle numérique châssis (MPa)	Contrainte dû à un effort de 400N (MPa)	Contrainte dû à un effort de 800N (MPa)
P1	8.6	4.5	8.1
P2	10	8.3	10.5
P3	15	10.6	16.3
P4	50	16	44.3

L'erreur absolue (référence modèle numérique châssis) est calculée entre les valeurs provenant du modèle du véhicule sous sollicitation et du modèle de la poutre installée sur le gabarit pour déterminer la précision du gabarit, figure 4.27. On constate qu'on atteint une précision élevée, l'erreur étant de l'ordre de 10%.

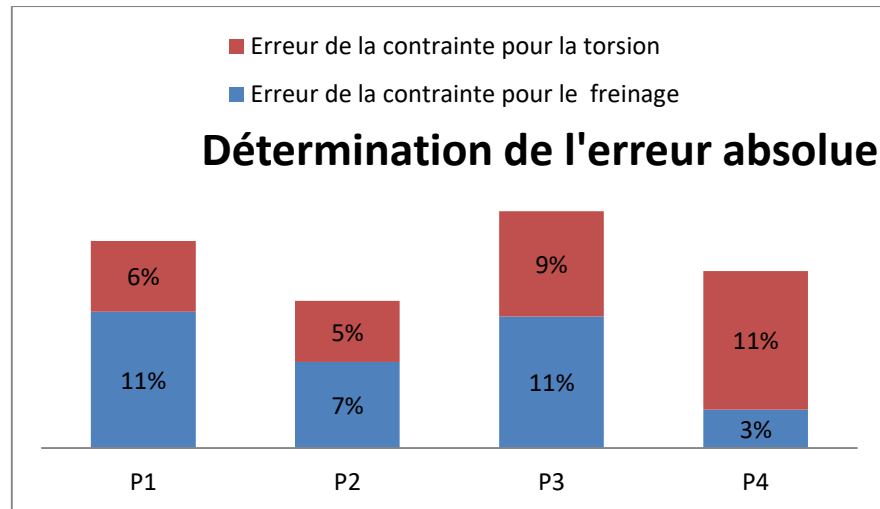


Figure 4.27: Erreur absolue sur la valeur de contrainte

Source d'erreur :

- Les jauges de déformations permettent d'obtenir les contraintes dans une zone du châssis et non à un point précis du fait de leur dimension. Or les valeurs du modèle numérique sont prélevées sur un point précis. Estimation de l'erreur : 5%

On peut observer les positions des jauges sur la figure 4.28. Deux jauges ont été placées au niveau des points P1 et P2. Il a été jugé suffisant de placer deux points de mesure expérimentales au lieu des quatre utilisées dans la partie numérique.

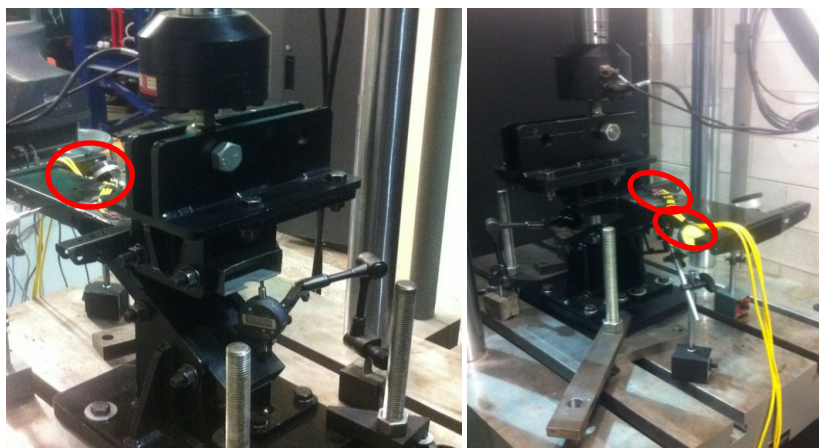


Figure 4.28: Dispositif expérimental

Les valeurs des efforts sont maintenant déterminées, le cas de chargement est connu, la prochaine étape est la détermination du spectre de sollicitation. Le spectre combiné aux chargements doit représenter et simuler ce que subit le véhicule au cours de sa vie. Le spectre ici est simplifié puisqu'on est en présence uniquement de deux chargements différents ; un chargement en flexion et un en torsion/flexion. Notre montage expérimental disposant uniquement d'un vérin, il sera nécessaire de changer la position du vérin à chaque changement de cycle. Dans le cas du spectre appliqué antérieurement, le changement de cycle se fait à une fréquence très élevée ce qui obligerait un changement de position de vérin trop fréquent. Pour optimiser le temps d'essai, il a été choisi de modifier le spectre en combinant plusieurs cas de chargements. Le spectre est présenté dans le tableau 4.8 suivant :

Tableau 4.8: Exemple de spectre pour l'essai d'étude du joint

	Nombre de freinage	Nombre de virage	Nombre de changements de position	Temps supplémentaire du au changement du vérin (heure)	Intervalle de temps entre deux changements		Temps total (heure)	nombre de changements total
					Freinage (heure)	Virage (heure)		
Nombre de cycles	5000	3500	50	12.5	1.39	0.97	130.6	100
Nombre de cycles	10000	7000	25	6.25	2.78	1.94	124.3	50
Nombre de cycle	25000	17500	10	2.5	6.94	4.86	120.6	20
Nombre de cycles	50000	35000	5	1.25	13.89	9.72	119.3	10
Nombre de cycles	125000	87500	2	0.5	34.72	24.31	118.6	4
Nombre de cycles	35714	25000	7	1.75	9.92	6.94	119.8	14
Nombre de cycles	31250	21875	8	2	8.68	6.08	120.1	16

L'essai a été réalisé pour valider la tenue en fatigue du joint pour une durée de vie estimée de 425 000 cycles avec un chargement correspondant au chargement réel. Il n'était pas question à ce moment du projet d'évaluer précisément le flux de contrainte dans la pièce mais de valider le joint et l'approche de détermination des efforts. Afin de valider le joint il a été décidé de placer des jauges afin de valider les contraintes au niveau des points de mesures présentés précédemment.

Pour mesurer les déformations, il a été choisi d'utiliser des rosettes planes qui permettent de déterminer les contraintes équivalentes à partir d'équations mettant en lien les différentes



déformations. (Figure 4.29). Ces jauges sont placées dans des zones qui ne présentent pas de concentration de contrainte, ce qui correspond à une approche de contrainte nominale. La jauge est placée au niveau de la poutre supérieure.

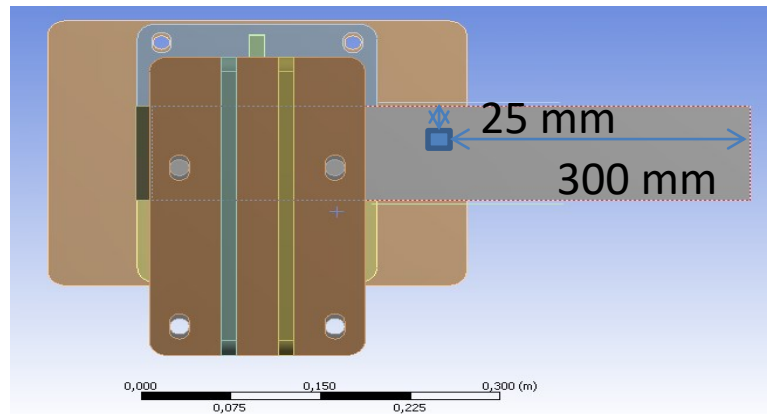


Figure 4.29: Position de la jauge sur la poutre installée sur le gabarit (vue de dessus)

## Résultats

La partie suivante présentera les résultats de l'essai en fatigue sur le joint en acier. On vérifiera l'intégrité de la pièce par une observation à l'œil nu, et on étudiera les valeurs de déplacement fournies par les jauges. Dans un premier temps, on vérifiera, à l'aide des données fournies par les jauges de déformation, que le chargement appliqué tout au long de l'essai est correct, figure 4.30.

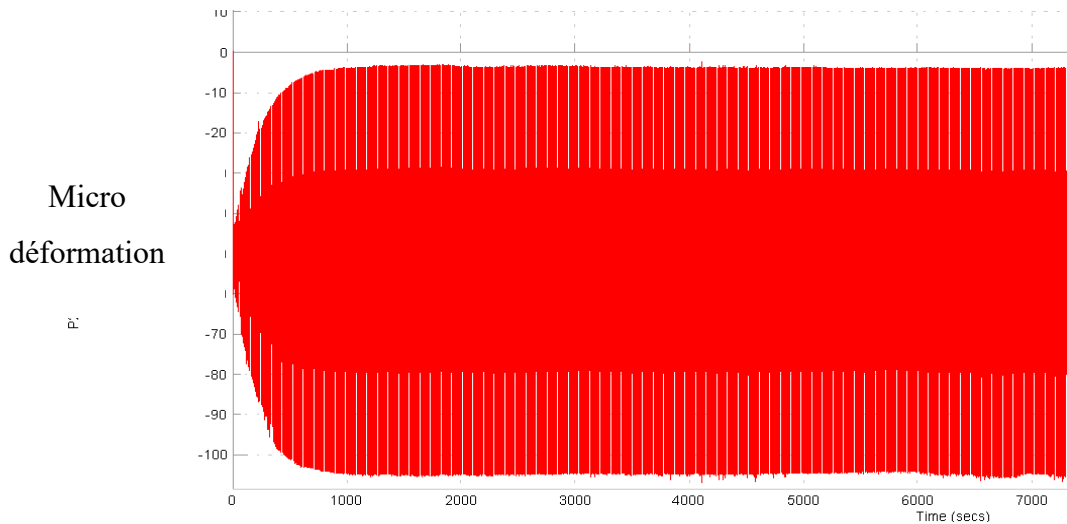


Figure 4.30: Courbe de déformation obtenue à partir d'une jauge sous un chargement de torsion (en ordonnée les micro déformations, en abscisse le temps en seconde)

### Analyse des déformations nominales

Les déformations nominales sont obtenues à partir du signal des jauges de déformation en rosette. Le logiciel permet de calculer directement le signal des jauges en déformation selon les différents angles des jauges suivant la formule suivante (4-2 et 4-3) :

$$\varepsilon_{max} = \frac{\varepsilon_{90} + \varepsilon_0}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{90} - \varepsilon_0}{2}\right)^2 + \varepsilon_{45}^2} \quad (4-1)$$

$$\varepsilon_{min} = \frac{\varepsilon_{90} + \varepsilon_0}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{90} - \varepsilon_0}{2}\right)^2 + \varepsilon_{45}^2} \quad (4-2)$$

où  $\varepsilon_{90}$  est la déformation mesurée par la jauge à 90 degrés

$\varepsilon_0$  est la déformation mesurée par la jauge à 0 degré

$\varepsilon_{45}$  est la déformation mesurée par la jauge à 45 degrés

La première étape de la validation est l'observation visuelle du joint lors de l'essai. Cette observation visuelle est effectuée à chaque changement de position du vérin, ce qui correspond à une observation à chaque fin de cycle. Certaines zones critiques du joint ont été répertoriées ; elles nécessitent une observation particulière puisque ce sont les zones géométriques présentant

une concentration de contrainte et les cordons de soudure. Aucune fissure ou amorce de fissure n'a été observée au cours de cet essai.

La deuxième étape est la vérification que le déplacement du vérin et les déformations obtenues par les jauges ne présentent pas de variation au cours de l'essai, ce qui serait une preuve de déformation plastique de la pièce. La courbe suivante (figure 4.31) est tirée à différents nombres de cycles pour chaque type de chargement, flexion et flexion/torsion combinée. C'est un travail fastidieux d'analyser tous les résultats provenant des jauges de déformations. La fréquence d'essai est de 1Hz et la fréquence de prise de points par le logiciel de mesure est de 5 HZ. L'analyse des déplacements et des déformations permet de montrer qu'il n'y a pas de déformation plastique au cours de l'essai.

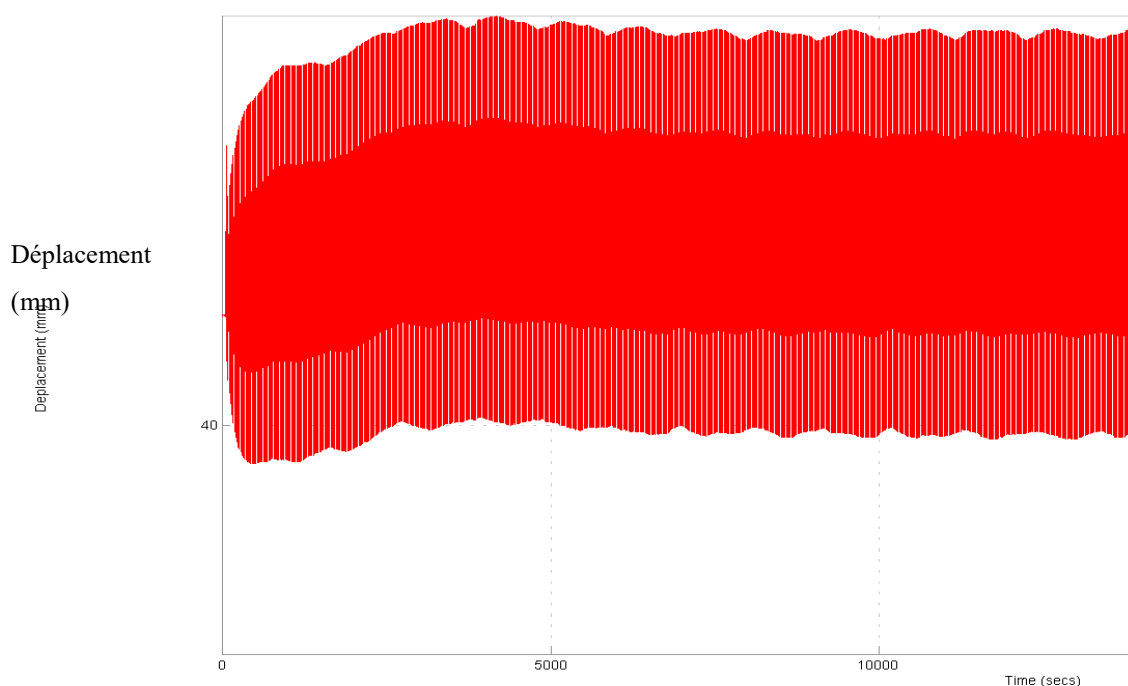


Figure 4.31: Courbe de déformation obtenue à partir d'une jauge sous un chargement de flexion (en ordonnée les déformations, en abscisse le temps en seconde)

Les déformations obtenues à partir des différentes jauges en rosette permettent d'obtenir la valeur de la contrainte équivalente à partir des équations présentées précédemment. Le calcul du dommage se base sur des données fournies par les courbes SN ; or les courbes SN sont uniques pour une géométrie et un matériau donné. Les courbes SN n'existent pas pour toutes

les géométries et particulièrement pour les cordons de soudure. Des données existent pour les aciers mais sont plus rares pour les alliages d'aluminium. Le calcul du dommage n'est donc pas possible dans les zones présentant des concentrations de contrainte et particulièrement dans les cordons de soudure. Dans notre cas, le cumul des dommages sera déterminé uniquement sur des géométries simples, comme par exemple sur le milieu de la face supérieure de la poutre supérieure, figure 4.32.

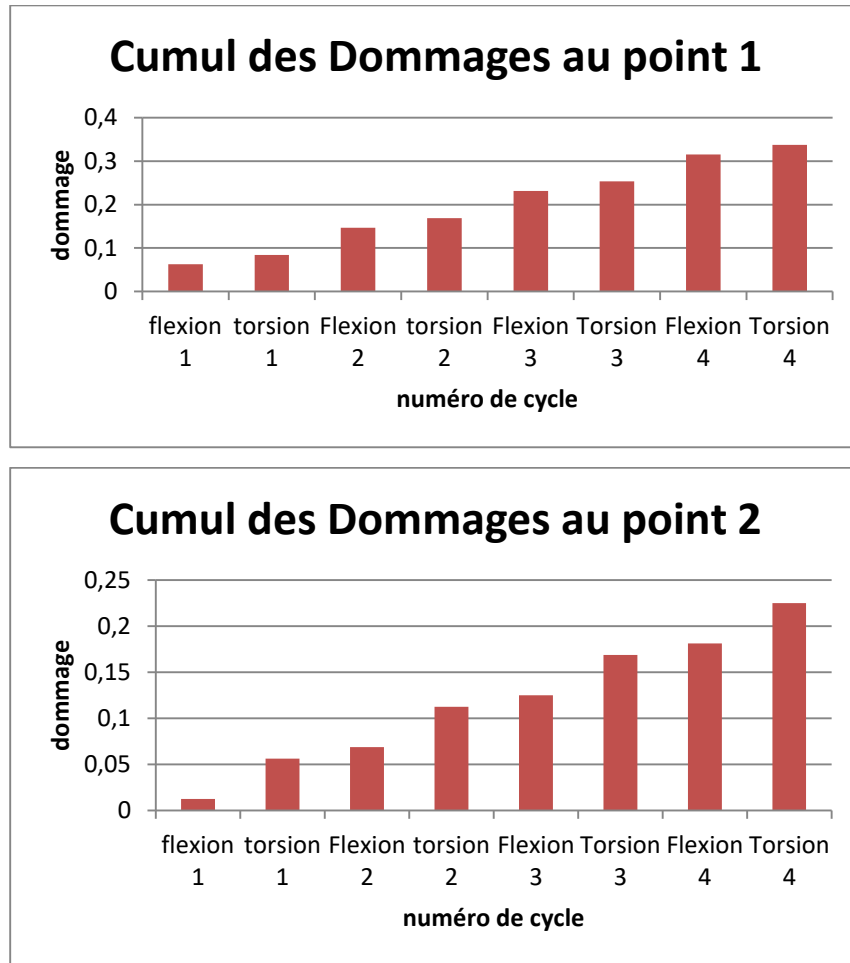


Figure 4.32: Dommage cumulé au niveau des points P1 et P2

On remarque que le cumul des dommages ne dépasse pas 1 ; il n'y aura donc pas de rupture de la pièce, résultat conforme aux résultats expérimentaux.

## Conclusion

Cet essai a permis de valider la méthodologie employée pour déterminer les efforts du vérin ainsi que le gabarit ; elle sera utilisée par la suite pour les différents autres essais. Les résultats obtenus étaient attendus car ce châssis est déjà en service et la tenue de ce joint ne posait pas de problème.

### 4.4.2. Étude du joint en aluminium

Les essais précédents ont permis de valider le gabarit et la méthodologie de définition des forces de vérin. Cette méthodologie a été appliquée au cas d'un joint en aluminium conçu dans le cadre de la conception du châssis en aluminium du véhicule Roadster électrique. Le même joint arrière du châssis a été étudié afin de pouvoir comparer les résultats avec le modèle en acier. Le comportement des joints soudés en aluminium étant méconnu, il a été décidé d'instrumenter la pièce afin d'évaluer les contraintes à ce niveau-là ; une approche hot spot a été employée. Les mêmes questions se posent pour cet essai que pour l'essai précédent, l'instrumentation du joint, le choix du chargement, du spectre, la conception du gabarit. Le gabarit sera celui utilisé pour l'essai sur le joint en acier, la détermination du chargement à appliquer respecte la même méthodologie que précédemment, le spectre sera identique à celui du test sur le joint en acier. Deux versions de joints seront testées dans la suite ; une première version soumise à un cyclage accéléré qui sera peu instrumenté et une deuxième version où sera appliquée l'approche hot spot. La géométrie du joint des deux versions est différente ; la version 2 est plus aboutie que la première.

Pour chaque version du joint, la géométrie, le cas de chargement et l'instrumentation choisie sont présentés dans cette section.

#### **1<sup>ère</sup> version :**

Avec les outils actuels et l'expérience des concepteurs présents au CTA, il est possible de concevoir une pièce qui ne présentera pas de fissure ni de rupture lorsque soumise à un chargement réel. Or le sujet d'étude concerne l'étude des joints et en particulier les cordons de soudure, il paraît donc important d'observer l'apparition d'une fissure au niveau d'un cordon de soudure. Afin d'être sûr d'observer une fissure, la géométrie développée présente une zone de forte concentration de contrainte dû à la géométrie. La zone de concentration se situe dans le

cercle noir, figure 4.33. Cette zone présente un angle vif, il y a la présence d'un cordon de soudure et est située dans une zone de forte contrainte dû au chargement. L'amorce de fissure a une forte probabilité de se produire dans cette zone.

La première version du joint possède une géométrie assez simple (figure 4.33). La géométrie du joint comprend deux poutres de profilés 4\*2 en aluminium 6061T6 et deux tôles d'aluminium 5253H36 utilisées pour les supports. La figure 4.34 présente le joint monté sur le gabarit de test.

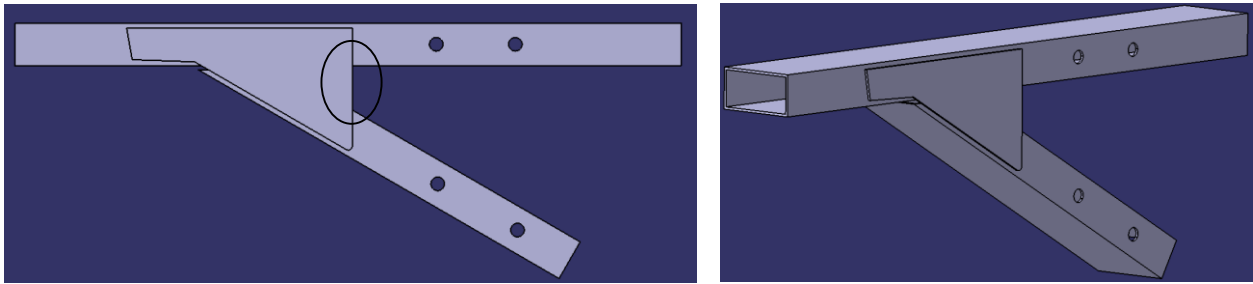


Figure 4.33: Géométrie du joint version 1

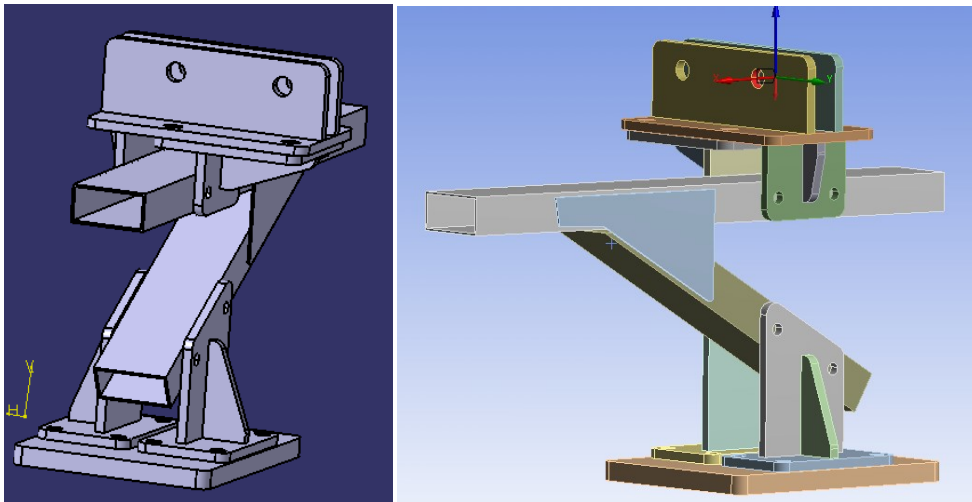


Figure 4.34: Présentation du joint arrière installé sur le gabarit

Le gabarit a déjà été validé en termes de sollicitation, il ne reste qu'à déterminer les valeurs d'effort du vérin pour reproduire les valeurs de contraintes réelles. La même méthodologie que pour le joint en acier sera appliquée. Les contraintes au niveau du joint arrière sont d'abord relevées sur un modèle par éléments finis du châssis entier en aluminium développé par C. Iorga

puis ensuite on tente d'atteindre ces valeurs avec le modèle local en faisant varier les valeurs de charge. Pour valider le chargement déterminé par le modèle par éléments finis, des jauges à cadran de déplacement (précises au millième de pouce) ont été installées pour mesurer le déplacement. Ces valeurs de déplacement obtenues expérimentalement seront comparées aux valeurs obtenues par le modèle par éléments finis.

Le modèle numérique fournit les valeurs suivantes pour la valeur d'effort dans le vérin : 3820 N pour le chargement en freinage et 2200N pour le chargement en torsion, figure 4.35.

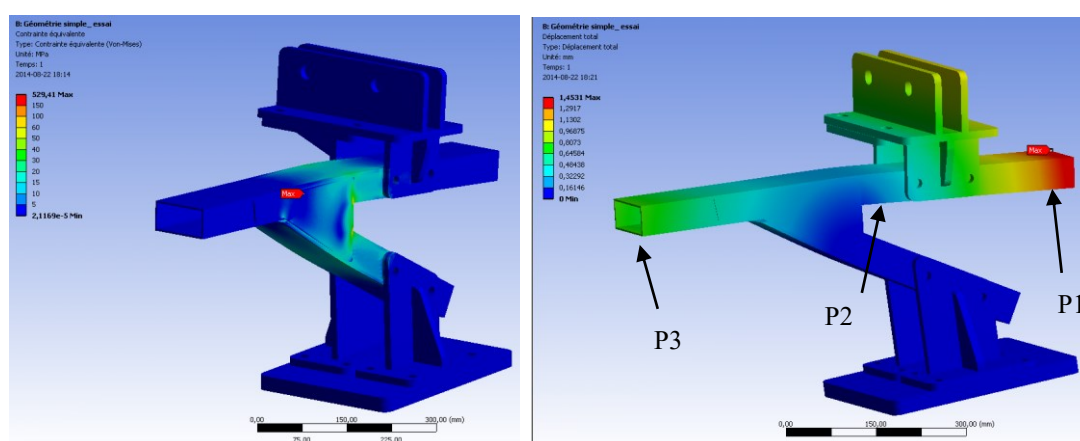


Figure 4.35: Distribution de contraintes sous un chargement de flexion à gauche, distribution de déplacements sous un chargement en flexion à droite

Les valeurs de déplacement suivantes ont été obtenues en appliquant un chargement moyen (force maximale divisée par deux), tableau 4.9 et 4.10.

Tableau 4.9: Validation des essais à l'aide du déplacement sous la charge moyenne Flexion

Point de mesure	Valeur calculée par le modèle numérique (mm)	Valeur relevée expérimentalement (mm)
P1	1.37	1.28
P2	0.54	0.49
P3	0.74	0.80

Tableau 4.10: Validation des essais à l'aide du déplacement sous la charge moyenne  
Torsion/flexion

Point de mesure	Valeur calculée par le modèle numérique (mm)	Valeur relevée expérimentalement (mm)
P1	1.036	0.98
P2	0.5	0.59
P3	0.47	0.52

L'erreur absolue (valeur de référence étant les valeurs numériques) est calculée en comparant les valeurs provenant du modèle numérique et expérimentale, pour déterminer la précision de l'essai, figure 4.36. On constate que la précision est importante, l'erreur est environ de 10%.

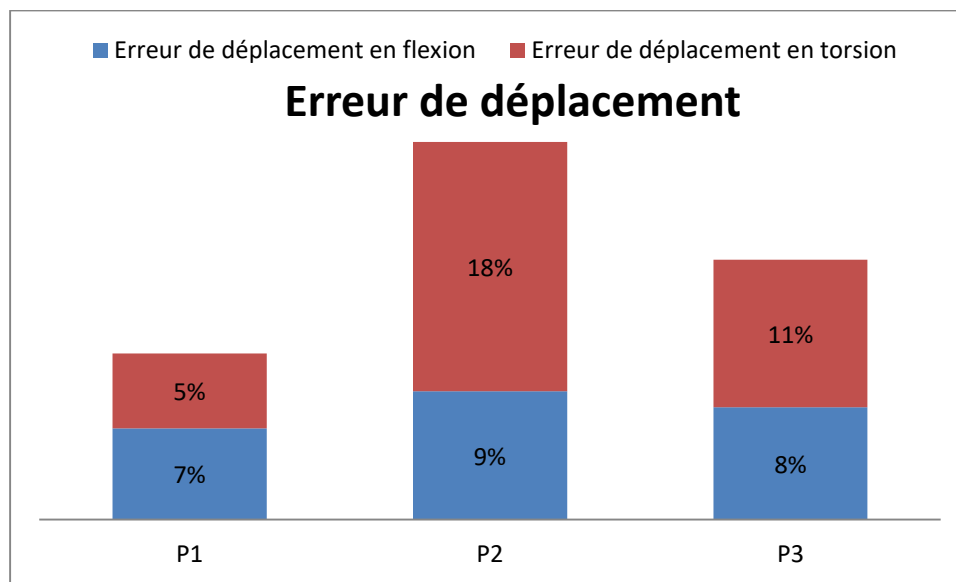


Figure 4.36: Erreur de déplacement

L'objectif de cet essai est d'observer l'apparition d'une fissure au niveau d'un cordon de soudure en aluminium. Cet essai permettra aussi d'évaluer les différents modèles numériques en comparant la zone de rupture prédite par le modèle numérique avec les zones obtenues de façon expérimentale.



Sources d'erreur :

- Erreur de lecture des résultats sur les jauges de déplacements et précision des jauges (résolution des jauges 0.1 mm)
- Erreur de position des points de lecture des déplacements sur le joint par rapport au point du modèle numérique.

## Résultats

La section suivante, permet de présenter les résultats de l'essai de fatigue réalisé sur le joint en aluminium (figure 4.37). L'absence d'instrumentation empêche de déterminer l'endommagement et de vérifier l'absence de déformation plastique invisible à l'œil nu par l'analyse des déformations. Cependant l'apparition de fissures est prévisible sur ce modèle du fait de la géométrie du support. Cet essai va permettre de vérifier que le modèle numérique prédit correctement la zone de rupture. Cet essai a permis également d'observer l'amorce de fissure au niveau d'un cordon de soudure et sa propagation.



Figure 4.37: Dispositif expérimental

On observe une amorce de fissure (figure 4.38) apparaître à partir du 378750ème cycle, ce qui représente 75% de la durée de vie. La fissure s'amorce au niveau du pied du cordon de soudure (figure 4.39 et 4.40) dans une zone de concentration de contraintes de façon symétrique, les deux supports présentant les mêmes fissures. La fissure s'est propagée jusqu'à la fin de l'essai. La fissure est bien due au phénomène de fatigue et on a pu observer la propagation de la fissure au cours de l'essai. La fissure a atteint une longueur de 10.6 mm à la fin de l'essai ce qui correspond à une propagation d'environ 0.1  $\mu\text{m}/\text{cycle}$ .

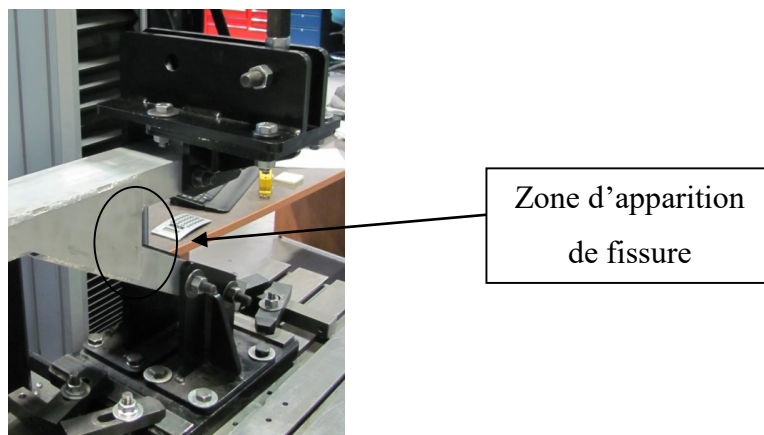


Figure 4.38: Localisation des fissures

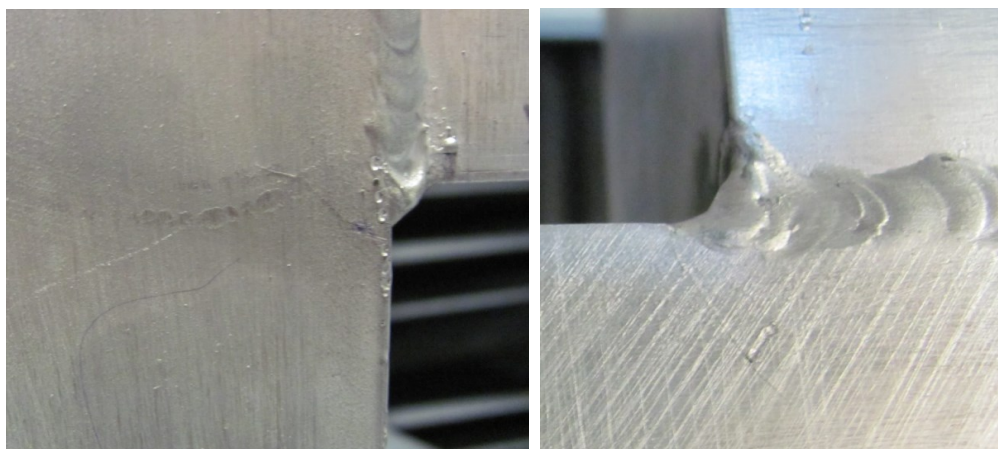


Figure 4.39: Fissure au niveau du cordon de soudure

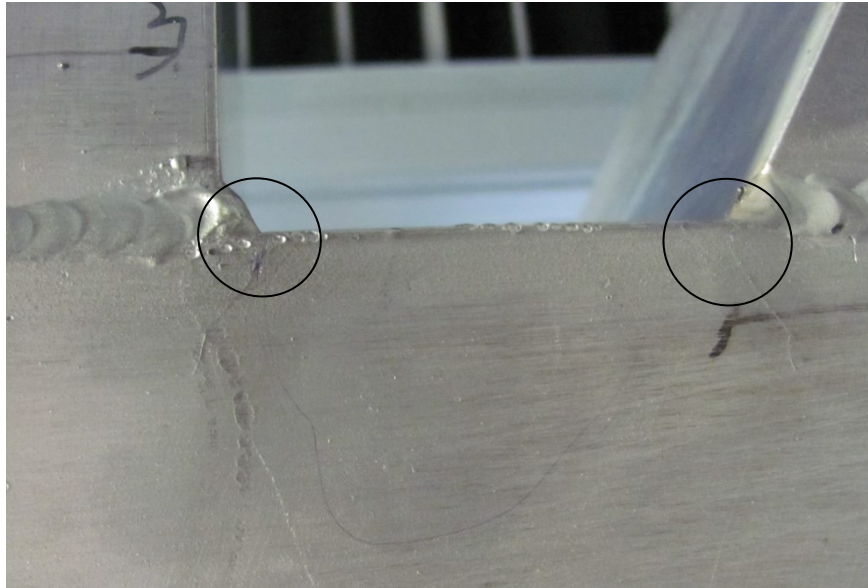


Figure 4.40: Fissure au niveau du cordon de soudure

La fissuration de la pièce peut être expliquée par plusieurs facteurs :

- La géométrie de la pièce n'est pas optimale et présente une zone de concentration de contrainte au niveau du point de fissuration;
- L'essai a été réalisé peu de temps après la pause du cordon de soudure (attente inférieure à 3 jours) ; le vieillissement naturel n'a donc pas eu le temps d'avoir lieu. Les caractéristiques mécaniques de la ZAT et du cordon de soudure n'étaient pas optimales;
- Les sollicitations induites par le cas de chargement sont plus sévères que dans le cas d'un chargement réel.

Pour le moment le modèle numérique a servi uniquement à la détermination des forces de vérin à appliquer pour reproduire le chargement réel. Il serait intéressant d'observer les valeurs de contrainte au niveau de la zone de fissure. La fissure est apparue au niveau du cercle rouge sur la figure 4.41. Au premier abord il semblerait qu'on soit en présence d'une zone de concentration de contrainte, cependant on constate que la concentration est élevée uniquement sur une très faible zone, la géométrie présente une arrête vive et de plus il y a une zone de contact entre deux pièces différentes. Tous ces points peuvent annoncer une singularité numérique. Le moyen de vérifier la présence d'une singularité est de réaliser une étude de convergence locale.

L'étude de convergence consiste à varier la qualité du maillage et à observer la valeur de la contrainte en ce point.

Quatre maillages ont été réalisés, M1, M2, M3 et M4. Le maillage M1 est quatre fois plus fin que le maillage M4. Ces maillages sont composés d'éléments solides de type tétraèdre quadratique à 10 nœuds. Un seul élément est nécessaire dans l'épaisseur de la pièce en vue de la dimension de la pièce. Les caractéristiques sont résumées dans le tableau 4.11. Les données de maillage ne concernent que la pièce numérotée 1. Le tableau 4.12 présente les contraintes relevées au point A. On constate que la contrainte ne converge pas lorsque l'on raffine le maillage. La valeur en ce point est donc une singularité et est donc porteuse d'aucune information pertinente.

Tableau 4.11 : Qualité du maillage

Maillage	Nb éléments	nb nœuds
M1	20184	34452
M2	15470	28430
M3	12454	21450
M4	9984	14589

Tableau 4.12 : Contrainte au point A

Maillage	contrainte au point A (MPa)
M1	890
M2	529
M3	248
M4	120

On note ici les limites du modèle par éléments finis qui ne peut fournir de résultats dans la zone qui nous intéresse dû fait de la géométrie.

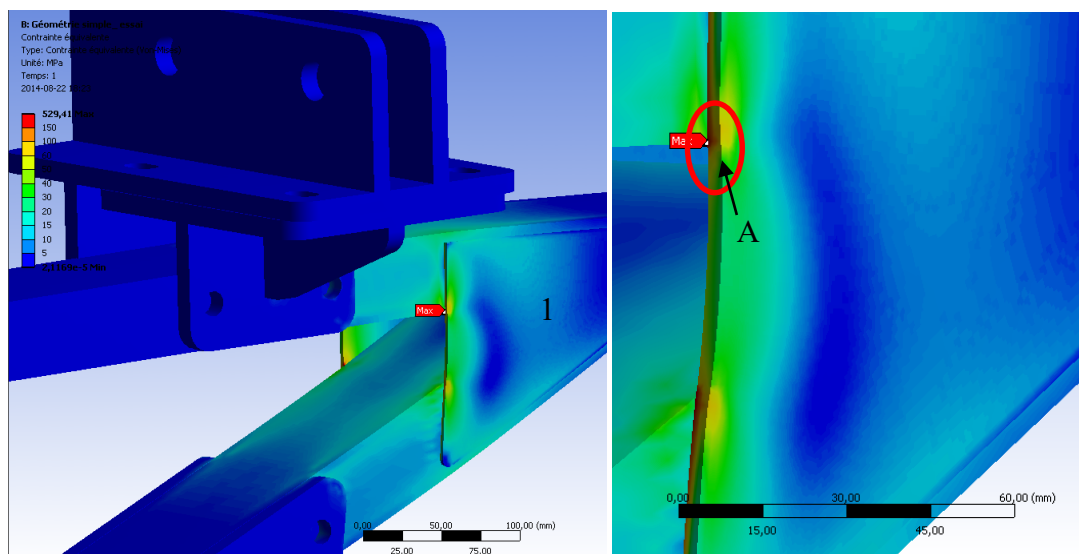


Figure 4.41 : Distribution de contraintes au niveau des zones d'amorce de fissure

## Conclusion

Cet essai a permis d'observer l'amorce d'une fissure au niveau d'un cordon de soudure en aluminium. De plus cet essai conforte la reproduction du chargement du châssis par le gabarit au joint étudié. Cet essai a pour objectif de répondre au troisième objectif énuméré à la section 1.4.2.

## 2<sup>ème</sup> version :

La première version du joint en aluminium présentant une fissure, une seconde géométrie a été conçue pour apporter des modifications permettant une meilleure tenue en fatigue. La géométrie précédente présentait des zones de concentration de contraintes dues à sa géométrie et à la présence du cordon de soudure. Cette géométrie étant assez proche de la géométrie finale destinée à être installée sur le châssis, un cyclage respectant parfaitement le chargement et le spectre réel a été réalisé afin d'observer le comportement le plus réaliste possible du joint.

La géométrie du joint comprend les deux mêmes poutres de profilé rectangulaire 4\*2 en 6061T6 et les deux tôles de 5253H36. La différence provient de la géométrie des supports qui ont été modifiés.

L'approche de la contrainte hot spot est envisagée pour l'étude de cette version du joint. Cette approche permet de déterminer la contrainte en un point précis de la structure ; on pourra ainsi déterminer de façon précise la contrainte au niveau du pied du cordon de soudure, zone de

l'amorce de fissure sur la plupart des assemblages soudés. La distance entre le centre des jauges de déformation et le pied du cordon de soudure est le paramètre important. Ces distances entre les jauges et le cordon de soudure sont mentionnés dans le guide IIW (42)

- $0.4*t$  entre la première jauge et le cordon de soudure
- $0.6*t$  entre la première et la deuxième jauge
- Et la longueur des jauges doit être inférieure à  $0.2*t$

où  $t$  désigne l'épaisseur du métal de base.

Appliqué à notre cas, cela impliquerait des jauges d'une longueur de 0.6 mm. Les jauges de cette dimension sont rares sur le marché et assez onéreuses. Le guide prescrit d'utiliser dans ce cas-là des jauges de dimension plus importante tout en modifiant les distances des jauges. Les distances deviennent  $0,3*t$  pour la première jauge,  $1.5*t$  pour la distance entre la première et la deuxième. Cela donne les dimensions suivantes pour notre cas d'étude :

- Pied du cordon de soudure à la 1<sup>ère</sup> jauge : 0.9mm
- 1<sup>ère</sup> jauge à la 2<sup>ème</sup> jauge : 4.5 mm

Dans notre étude on souhaite instrumenter le joint arrière en aluminium avec pour objectif principal de déterminer les valeurs de contraintes au niveau du cordon de soudure afin de comparer les valeurs obtenues aux valeurs fournies par le modèle numérique. Les jauges seront placées de telle façon à obtenir les contraintes au niveau du pied du cordon de soudure, zone la plus critique du cordon.

Une relation particulière a été mise en place pour déterminer la déformation hot spot à partir des deux jauges et ensuite la contrainte hot spot.

$$\varepsilon_{hotspot} = \varepsilon_{canal1} + \left( x_1 \times \frac{\varepsilon_{canal1} - \varepsilon_{canal2}}{x_{1-2}} \right) \quad (4 - 4)$$

où :  $\varepsilon_{hotspot}$  est la déformation hot spot

$\varepsilon_{canal1}$  est la déformation mesurée par la jauge 1

$\varepsilon_{canal2}$  est la déformation mesurée par la jauge 2

$x_1$  est la distance entre le pied de cordon de soudure et la jauge 1

$x_{1-2}$  est la distance entre la jauge 1 et la jauge 2

Pour obtenir la contrainte hot spot il ne reste alors plus qu'à multiplier par la valeur du module de Young du matériau, la valeur de la déformation hot spot.

Ce type d'instrumentalisation est délicat et le temps d'installation est important. Une grande attention et beaucoup de minutie doivent être portées à l'installation du fait des faibles distances.

Il n'existe pas encore actuellement de courbes hot spot pour les assemblages en alliage d'aluminium soudé. La SAE suggère une méthode alternative basée sur les courbes S-N nominales. Cette méthode alternative *consiste à utiliser un joint bout-à-bout en tension d'une classe (FAT) de la norme BS8118 correspondant à la classe pour méthode nominale rapportée au rapport de la contrainte nominale sur la contrainte hot spot comme suit (42) :*

$$FAT_{hotspot} = \frac{\sigma_{nominal}}{\sigma_{hot spot}} FAT_{nominal} \quad (4 - 5)$$

où  $FAT_{hotspot}$  est la résistance en fatigue de la soudure selon l'approche hot spot

$FAT_{nominal}$  est la résistance en fatigue de la soudure selon l'approche nominale

$\sigma_{nominal}$  est la contrainte dans la soudure évaluée selon l'approche hot spot

$\sigma_{hot spot}$  est la contrainte dans la soudure évaluée selon l'approche nominale

Les contraintes de temps et de ressources ont rendu impossible la réalisation de cette instrumentation et de l'essai en fatigue de la dernière version du joint en aluminium. Pour assurer la validité statistique des résultats, un certain nombre d'échantillons est nécessaire. Pour que les résultats puissent servir de norme de conception, il faut réaliser l'essai sur 12 échantillons. L'utilisation de l'approche hot spot permet de développer des courbes d'endurance génériques pour tous les assemblages mécano-soudés faisant appel au même type de matériau et au même type de soudure. La suite logique de ce projet serait la réalisation de ces essais afin de développer ces courbes d'endurance ce qui permettrait de définir complètement le comportement d'un joint du Roadster.

### **Conclusion :**

La réalisation de cet essai avec une approche hot spot permettra de déterminer les contraintes au niveau du pied de cordon de soudure et ainsi valider le modèle numérique présenté à la

section 4.6. Cependant il n'a pas pu être réalisée à cause de la contrainte de temps, la décision d'étudier ce joint a été prise trop tard. Entre la date de prise de décision et la date de fin de ma maîtrise, je n'ai eu le temps que de réaliser l'essai de la première version.

### **Conclusion de la seconde étape de la méthodologie :**

La seconde étape de la méthodologie a pour objectif de valider la géométrie du joint et du procédé d'assemblage sélectionné. Cependant sur les deux essais prévus initialement un seul a pu être réalisé. L'essai a été effectué avec un chargement représentant le chargement réel subi par le véhicule pendant sa durée de vie. Mais cet essai apporte des indications importantes :

- Le joint présente des fissures au niveau d'une zone géométrique présentant une concentration de contrainte, géométrie qui sera modifiée pour le châssis avec la suppression de cette arête vive. Cette géométrie avait été spécialement conçue pour faire apparaître des fissures. Les fissures visibles sont survenues après une durée de vie consommée de 75%. De plus, la forme des fissures et leur vitesse de propagation ( $0.1 \mu\text{m}/\text{cycle}$ ) assure une défaillance lente et non catastrophique du joint;
- Le reste du joint ne présente pas de trace d'amorce de fissure.

Les procédés de fabrication et d'assemblage peuvent donc être validés pour ce joint selon des critères mécaniques.

## **4.5. Étude du cintrage d'un profilé rectangulaire 6061T6**

Une autre problématique s'est révélée au cours de l'étude et de la conception du châssis en aluminium. La nouvelle géométrie du châssis (figure 4.42) présente un rayon de cintrage assez sévère surtout que l'alliage 6061T6 est connu pour sa faible capacité de pliage. La faisabilité des poutres supérieure et inférieure peut donc être remise en question. Y. Mogenot (1) s'intéresse à ce point-là dans son mémoire; il signale qu'il n'existe pas à l'heure actuelle de document ou guide fournissant les valeurs de rayon de cintrage pour le profilé utilisé dans ce projet. Il existe uniquement des données sur le pliage des tôles minces. On peut constater cependant que les rayons de pliage pour ces tôles sont très inférieurs aux autres alliages (1) ce qui laisse craindre que le profilé ne sera pas pliable. La version acier du châssis présente un rayon minimal de 180 mm au niveau de la poutre supérieure avant. Une solution simple serait



de changer le grade de l'alliage, pour passer d'un traitement thermique T6 à un T0, le T0 présentant un rayon de pliage proche de celui de l'acier utilisé pour le châssis. Cependant cette solution nécessiterait deux opérations de traitement thermique, une première pour passer du T6 au T0 et une seconde pour passer du T0 au T6. Ces opérations rajouteraient un coût non négligeable au coût total du châssis ; cette solution est donc rejetée.

Les objectifs de cette section sont de déterminer le rayon minimal pouvant être obtenu avec le profilé en aluminium 6061T6 et de vérifier ses caractéristiques mécaniques. En effet, l'opération de cintrage peut entraîner des amorces de fissure dans la zone présentant le rayon minimal, diminuant ainsi la durée de vie du matériau.

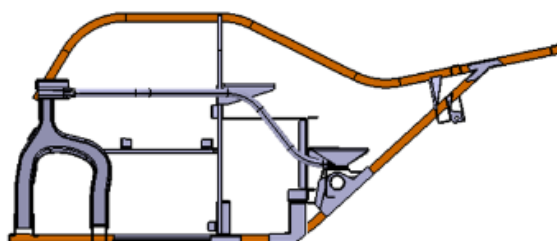


Figure 4.42: Châssis en aluminium

Une entreprise externe spécialisée dans le pliage de l'aluminium, PVC Architectural, a été contactée. La mission confiée à cette entreprise est de trouver le rayon minimal possible pour le cintrage du profilé, en se rapprochant au maximum du rayon de 180mm. Les résultats des essais réalisés par C. Iorga montrent que le rayon minimum obtenu est de 260 mm pour un investissement raisonnable, figure 4.43.



Figure 4.43: Poutre pliée au rayon de 190 mm

Plusieurs essais sont planifiés afin de répondre aux différents problèmes posés par le cintrage. Un essai de fatigue pour évaluer la tenue en fatigue est programmé et un cordon de soudure sera posé au niveau du rayon pour évaluer l'impact de la soudure.

### **Essai de fatigue**

L'échantillon à l'étude est donc une poutre cintrée (figure 4.44). L'objectif de cet essai de fatigue est de valider la tenue en fatigue de la poutre cintrée soumise au chargement réel déjà présenté dans la section concernant l'étude du joint arrière.

Deux solutions s'offrent à nous pour évaluer les caractéristiques de cet échantillon, la première est une méthode comparative réalisée avec deux essais, un sur une poutre cintrée et le second sur une poutre simple. Cette solution nécessiterait la création de deux gabarits vu que les deux échantillons ne présentent pas la même géométrie. De plus, il serait difficile de reproduire la même sollicitation sur les deux géométries. Cette solution permettrait le développement d'une courbe d'endurance pour les poutres cintrées. La seconde solution est de réaliser un essai de fatigue sur la poutre cintrée avec un chargement reproduisant les sollicitations réelles. Si la poutre ne présente pas d'amorce de fissure lors de ce chargement, elle sera donc apte au service sur le Roadster. C'est la seconde solution qui est choisie pour sa facilité de mise en œuvre et par le fait que le premier objectif est de valider la géométrie pour le Roadster et non de développer des courbes d'endurances.

La réalisation de cet essai pose plusieurs questions qui sont l'instrumentation du profilé, le choix du chargement, le choix du spectre de cyclage et la conception du gabarit. On répondra à ces questions dans la suite de cette partie. On constatera que plusieurs points sont liés.

Le premier point est la conception d'un gabarit ; les problématiques soulevées par la conception d'un gabarit ont déjà été évoquées dans les sections précédentes. Le gabarit est constitué d'une partie support permettant de fixer la poutre au bâti et une partie supérieure permettant d'appliquer les efforts. Cette dernière partie est constituée d'une pièce avec deux emplacements pour fixer la rotule du vérin ; un pour simuler le chargement en flexion et un autre pour le chargement en torsion/flexion combinée.

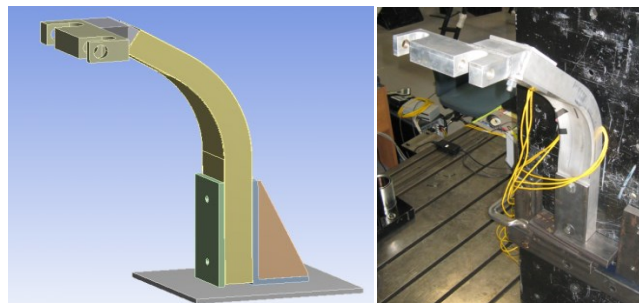


Figure 4.44: Présentation du gabarit pour l'essai de fatigue et dispositif expérimental

L'approche utilisée pour déterminer les efforts à appliquer est identique à celle employée précédemment. Les valeurs de contraintes sont relevées sur 3 points présentés à la figure 4.45, à la fois sur le modèle numérique du châssis aluminium entier et sur le modèle numérique du gabarit (tableau 4.13 et 4.14). Le chargement est représenté sous forme de graphique, figure 4.47 et 4.48.

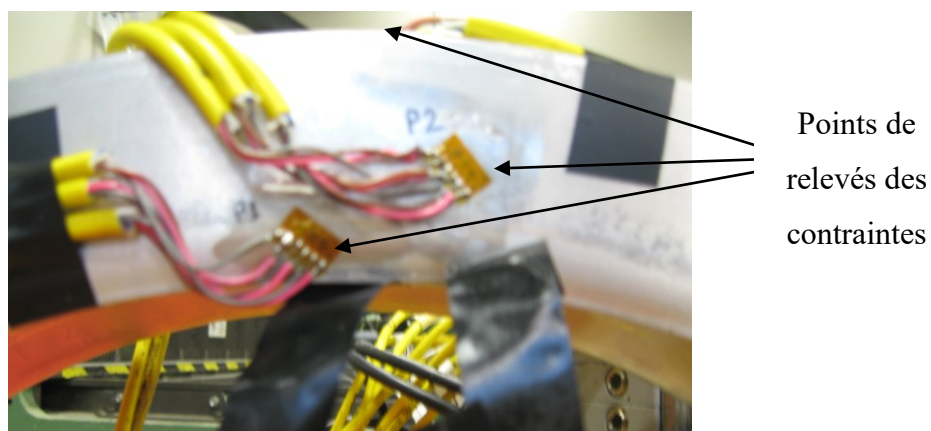


Figure 4.45 : Emplacement des jauges de déformation

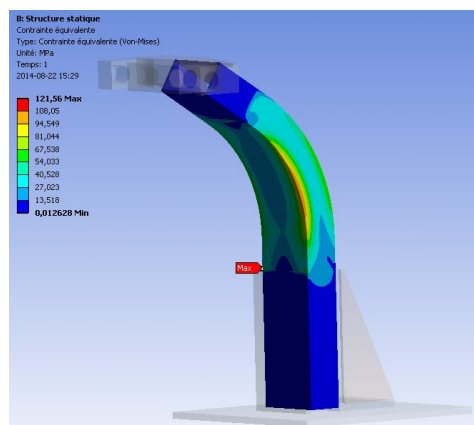


Figure 4.46: Distribution de contrainte sous un chargement en freinage

Comme dans le cas de l'essai du joint, l'observation du modèle 3D uniquement n'est pas suffisante pour valider la distribution de contraintes. On a relevé les valeurs de contraintes le long de la face latérale de la poutre. Plusieurs relevés ont été réalisés le long de la poutre pour valider le gabarit. Dans ce document, uniquement un de ces relevés sera présenté. Les valeurs de contraintes ont été relevées au niveau du rayon minimal où les valeurs de contraintes sont les plus importantes. La figure 4.47 présente la comparaison entre les deux distributions de contraintes; on constate que la distribution est très semblable et que le gabarit crée une distribution plus sévère.

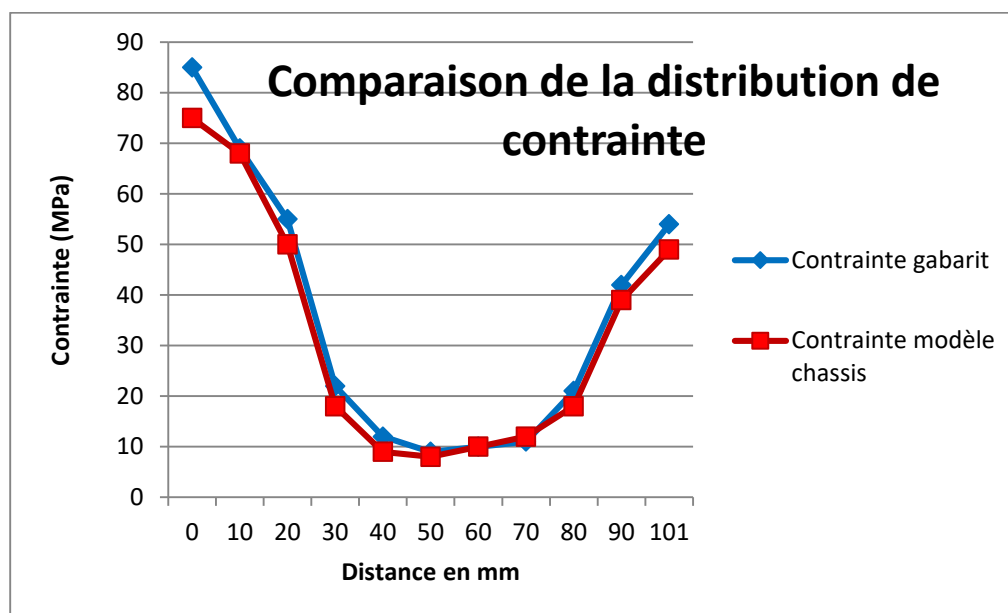


Figure 4.47: Comparaison de la distribution de contraintes

Tableau 4.13: Valeurs des contraintes selon différents points de mesure dans le cas d'un chargement en freinage

Points de mesure	Contrainte modèle numérique châssis (MPa)	Contrainte due à un effort de 1200N (MPa)	Contrainte due à un effort de 1500N (MPa)	Contrainte due à un effort de 1650N (MPa)
P1	90	92	116	130
P2	45	32	40	45
P3	30	36	37	41

Tableau 4.14: Valeur des contraintes selon différents points de mesure dans le cas d'un chargement en virage

Points de mesure	Contrainte modèle numérique châssis (MPa)	Contrainte due à un effort de 500N (MPa)	Contrainte due à un effort de 1000N (MPa)	Contrainte due à un effort de 1230N (MPa)
P1	90	44.5	90	111
P2	45	20.5	40	52
P3	30	13	27	33

L'erreur absolue est calculée pour déterminer la précision de l'essai (figure 4.48). On constate que les efforts appliqués expérimentalement provoquent une contrainte plus importante sur la poutre que celle prédite par le modèle numérique. Cette différence peut être expliquée par le fait que le modèle numérique ne reproduit pas exactement la géométrie. En effet, l'opération de cintrage entraîne un enfoncement au niveau du rayon minimal qui n'est pas modélisé dans le modèle numérique.

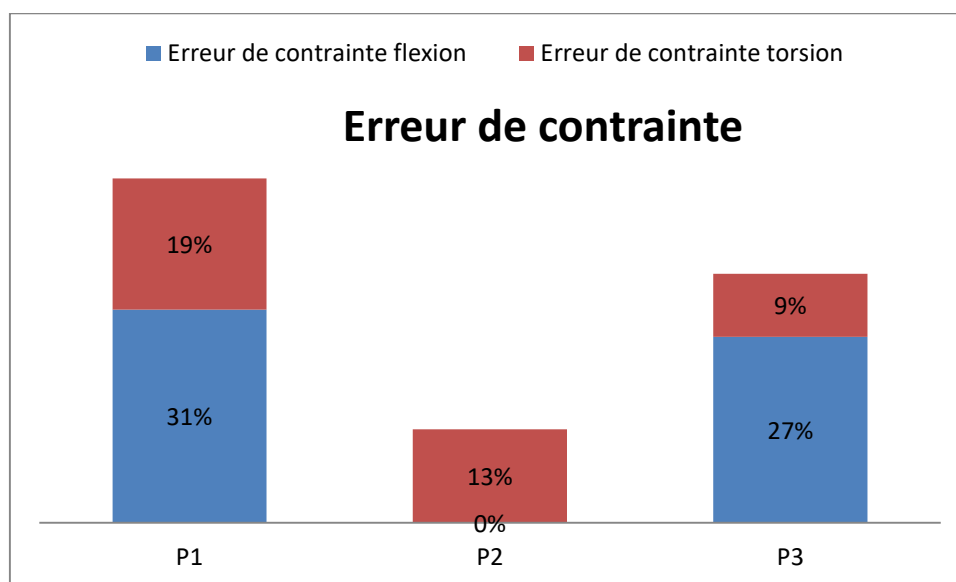


Figure 4.48: Erreurs entre valeurs expérimentales et numériques

## Résultat du test

Le spectre est le même que celui utilisé pour les essais sur le joint arrière et la durée de vie souhaitée du châssis en aluminium est aussi la même que celle du joint en acier tel que présenté dans le tableau 4.5.

La première étape de la validation est l'observation visuelle de l'échantillon lors de l'essai. Cette observation visuelle est effectuée à chaque changement de position du vérin, ce qui correspond à une observation à chaque fin de cycle. Certaines zones critiques de l'échantillon ont été répertoriées ; elles nécessitent une observation particulière puisque ce sont les zones géométriques présentant une concentration de contrainte et les cordons de soudure. Aucune fissure ou amorce de fissure n'a été observée au cours de cet essai.

La figure 4.49 présente les valeurs fournies par la jauge de déformation numéro 2. Cette figure permet de montrer que l'effort est appliqué de façon répartie au cours du temps. On peut observer aussi pour les cycles 0 à 200 que la valeur de contrainte maximale lors de l'essai est atteinte ; cela correspond à la validation de l'effort à appliquer, obtenu par le modèle numérique

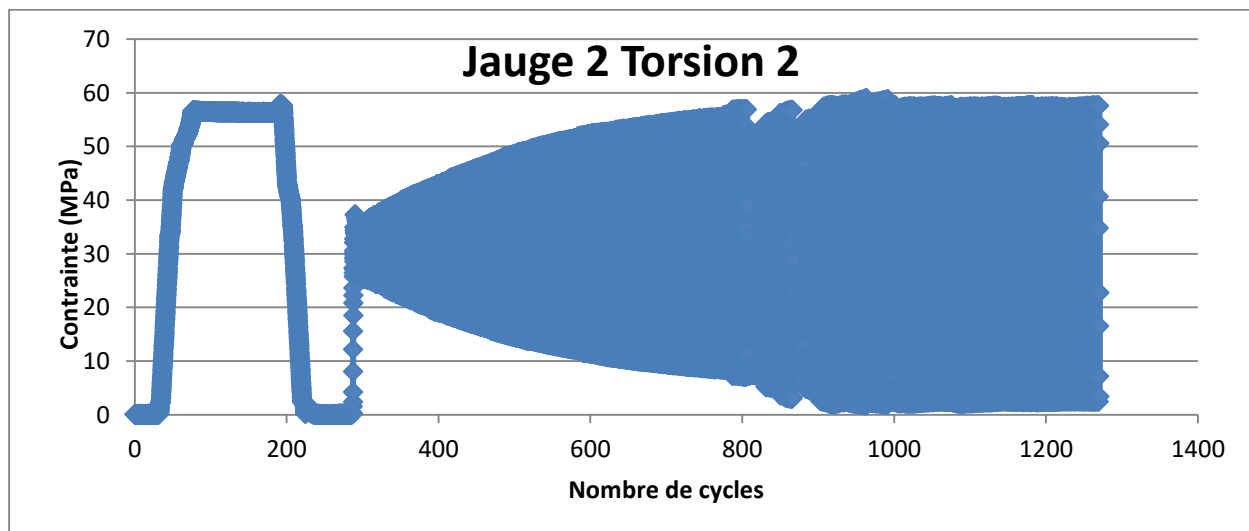


Figure 4.49: Données fournies par la jauge 2 sous un chargement en torsion

La crainte de la présence de microfissures invisibles à l'œil nu au niveau du rayon minimal de courbure a entraîné l'observation au microscope de la poutre. Afin d'avoir des points de comparaison, l'observation au microscope est réalisée avant et après l'essai de fatigue. Évidemment on s'attend à ce que les fissures soient situées au niveau du rayon minimal ; l'observation va donc se consacrer sur cette zone.

L'observation n'a révélé aucune fissure ou microfissure sur la pièce. On a pu observer des égratignures (figure 4.50 présentes avant et après l'essai mais leurs dimensions n'ont pas évolué.

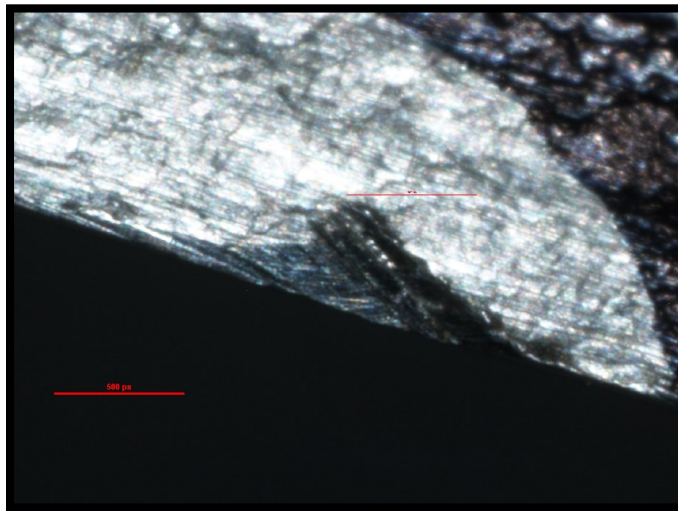


Figure 4.50: Observation au microscope d'une égratignure sur la poutre cintrée (X12)

Le cumul des dommages ne peut être calculé que sur les points où l'on peut déterminer la contrainte de façon expérimentale, c'est-à-dire au niveau des jauges de déformation. Cependant un important inconvénient est que le cumul des dommages est déterminé à partir de la courbe SN du matériau. Or l'opération de cintrage a pu modifier le comportement du matériau et donc rendre obsolète cette courbe. Le cumul des dommages a donc uniquement un sens dans les zones éloignées du cintrage, figure 4.51 et 4.52.

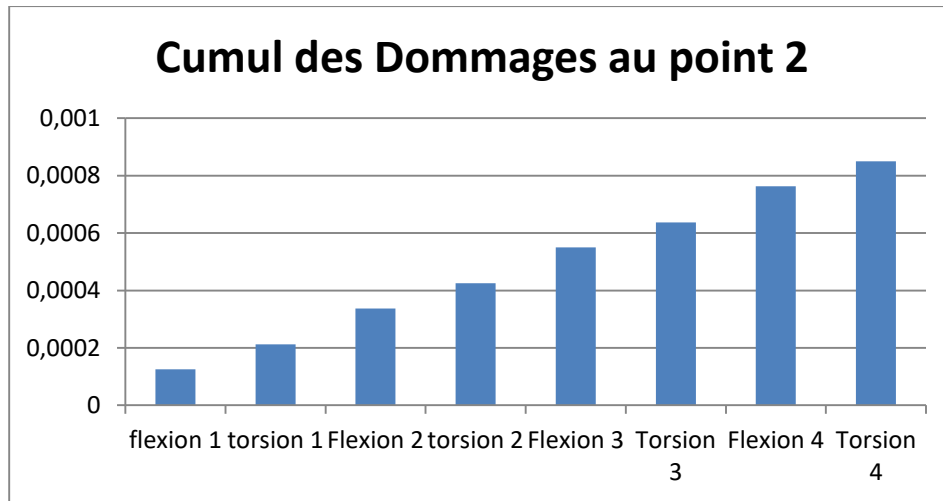


Figure 4.51 : Dommage au niveau du point 2

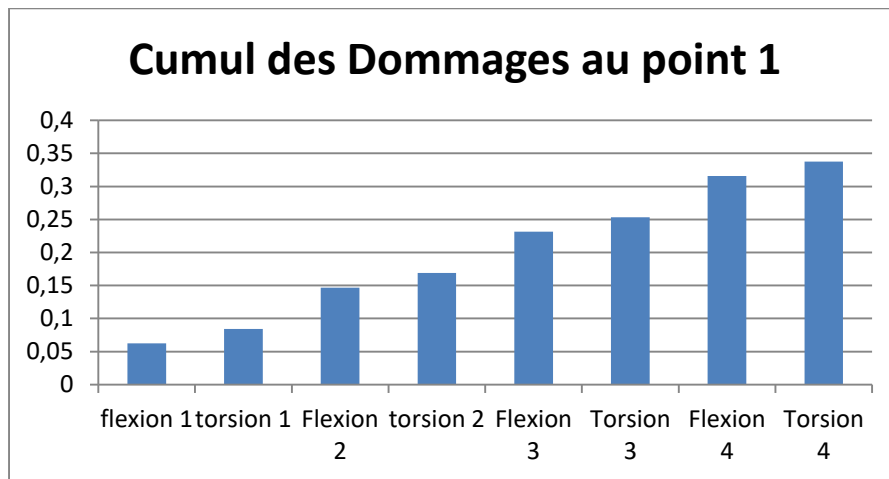


Figure 4.52: Dommage au niveau du point 1

### Conclusion :

L'essai réalisé a permis de valider la tenue en fatigue de la poutre cintrée sous les chargements réels. Cette étude permet de valider l'utilisation de poutre de profile 4x2 en 6061T6 ayant un rayon minimum de 260 mm sur le châssis. Cet essai permet de compléter le quatrième objectif fixé à la section 1.4.2.

## 4.6. Calcul des contraintes par la méthode des éléments finis

Cette section présente la méthode de calcul des contraintes locales en pied de cordon de soudure à l'aide d'un logiciel d'analyse par éléments finis. Plusieurs méthodes de calcul existent pour



déterminer la contrainte au niveau du pied du cordon de soudure, notamment la méthode du rayon fictif et la méthode du rayon réel moyen (43). L'approche par la méthode du rayon fictif présente des meilleurs résultats mais un manque de données relatives aux alliages d'aluminium et plus particulièrement aux structures à parois minces remet en cause son utilisation. Les contraintes seront donc déterminées à l'aide du rayon réel moyen.

Une nouvelle modélisation est nécessaire car la modélisation utilisée couramment au CTA par les différents intervenants du projet présente certains inconvénients. Dans un premier temps, détaillons la modélisation des contacts. On choisit de modéliser le cordon de soudure à l'aide de contact « arête-surface ». Cette modélisation est détaillée par (1). Cette modélisation simplifiée des cordons de soudure ne fournit pas les valeurs de contraintes correctes ni l'emplacement des concentrations de contraintes, figure 4.53. La qualité du maillage a une très grande influence sur la valeur des résultats. Si le maillage ne coïncide pas parfaitement entre les deux pièces, des effets locaux peuvent apparaître et créer une zone de concentration de contrainte artificielle.

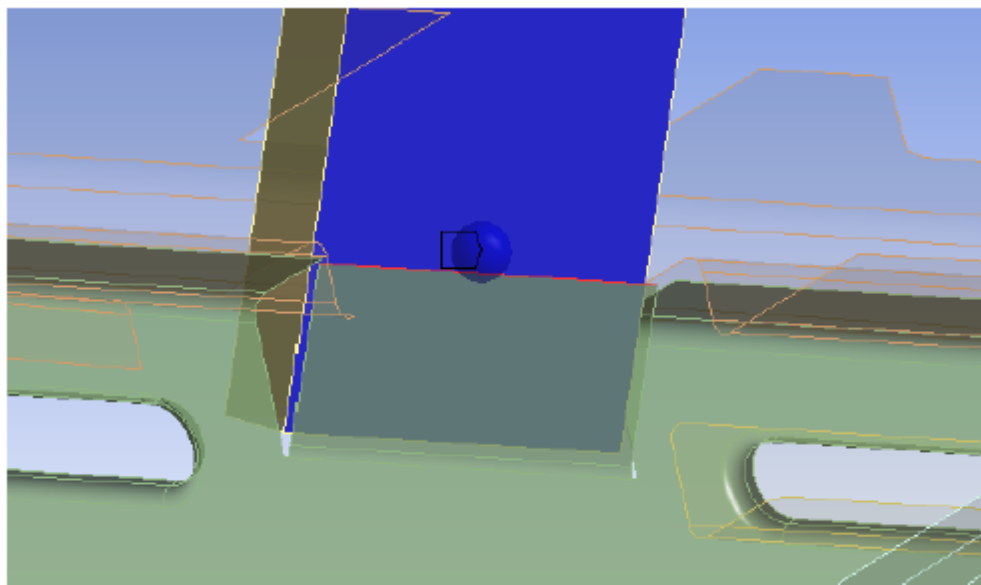


Figure 4.53: Exemple de modélisation d'un joint soudé

Pour les fins de calcul des contraintes locales, les soudures sont représentées sur le modèle 3D de la structure du joint arrière présenté dans les sections précédentes. Le cordon de soudure est modélisé le plus fidèlement possible par rapport au cordon réel. Il est donc nécessaire de

déterminer de façon précise les caractéristiques géométriques du cordon de soudure étudié. Une série de mesure est effectuée sur des cordons de soudure typiques que l'on retrouve sur le châssis afin d'identifier les caractéristiques géométriques moyennes. Les paramètres mesurés sont le rayon de raccordement, la longueur de la racine, ainsi que l'angle de raccordement du cordon. Les quatre échantillons sont coupés en deux dans le sens longitudinal ce qui permet de mesurer les caractéristiques géométriques des cordons de soudure de chaque côté de la coupe, figure 4.54.

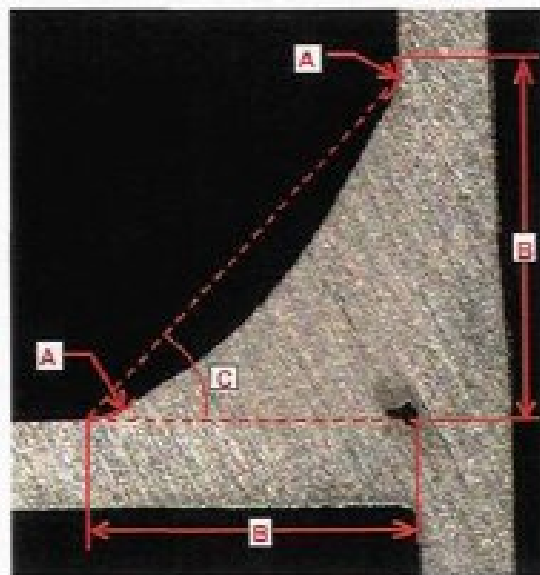


Figure 4.54: Exemple de coupe d'un cordon de soudure (43)

Chaque cordon est observé au microscope à des grossissements allant de 1 à 11. Les valeurs moyennes finales arrondies qui sont utilisées pour la modélisation des cordons de soudure dans le modèle par éléments finis sont donc :

- Rayon de raccordement A : 0.8mm (écart type 0.01, étendue 0.03)
- Longueur de la racine B : 3.175 mm (écart type 0.15, étendue 0.4)
- Angle de raccordement C : 20° (écart type 0.64, étendue 1.75)

La connaissance des différents paramètres du cordon de soudure permet de modéliser de façon précise le cordon de soudure sous un logiciel de CAO (4.55). Ce type de modélisation implique que le cordon de soudure et la pièce ne forment qu'une seule pièce. Ainsi, lors du transfert de la pièce sous le logiciel d'éléments finis, le cordon de soudure et la pièce se verront appliquer le

même matériau. Ce fait peut entraîner des erreurs dans les résultats mais il est à noter que les fissures en pied de cordon de soudure sont induites principalement par des paramètres géométriques tels que le rayon de raccordement.

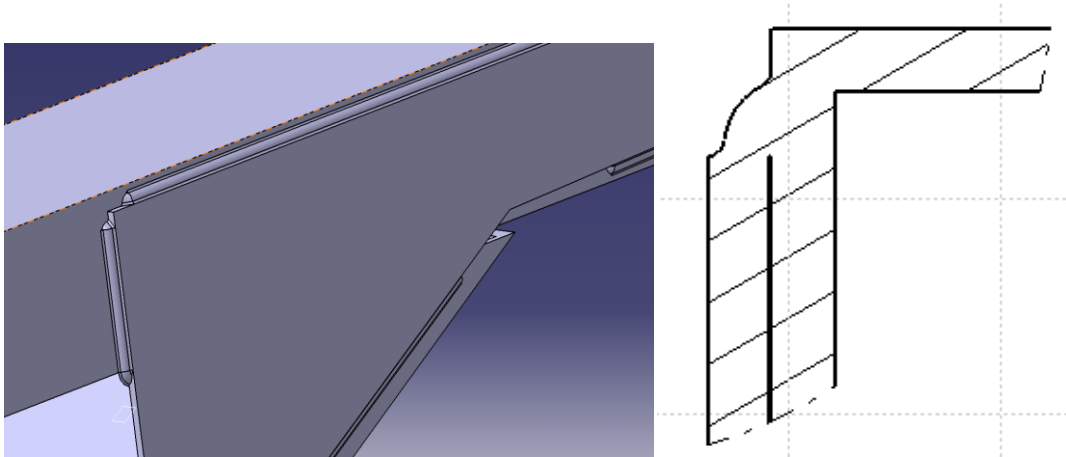


Figure 4.55: Modèle CAO du cordon de soudure

De base le logiciel ANSYS ne prend pas en compte le comportement plastique d'un matériau, il l'applique une déformation élastique (loi de Hooke) quelle que soit la valeur de la contrainte. Pour obtenir la simulation du comportement plastique il est nécessaire d'introduire la courbe contrainte-déformation du matériau souhaité dans le logiciel. Cette courbe pour l'alliage 6061T6 n'est pas disponible dans la base de données d'ANSYS. Les courbes obtenues expérimentalement aux sections 4.3.1 et 4.3.2 vont pouvoir être injecté dans le logiciel, il sera ainsi possible de modéliser le comportement plastique. La figure 4.56 montre l'application sur un cas simple l'effet de la prise en compte de la déformation plastique. Deux simulations sont effectuées une prenant compte la déformation plastique (en haut de la figure 4.56) l'autre non (en bas de la figure 4.56). Dans les deux cas les éprouvettes sont soumises à une charge de 15kN afin de dépasser la limite élastique. L'éprouvette a une section de  $54 \text{ mm}^2$  dans sa partie la plus mince.

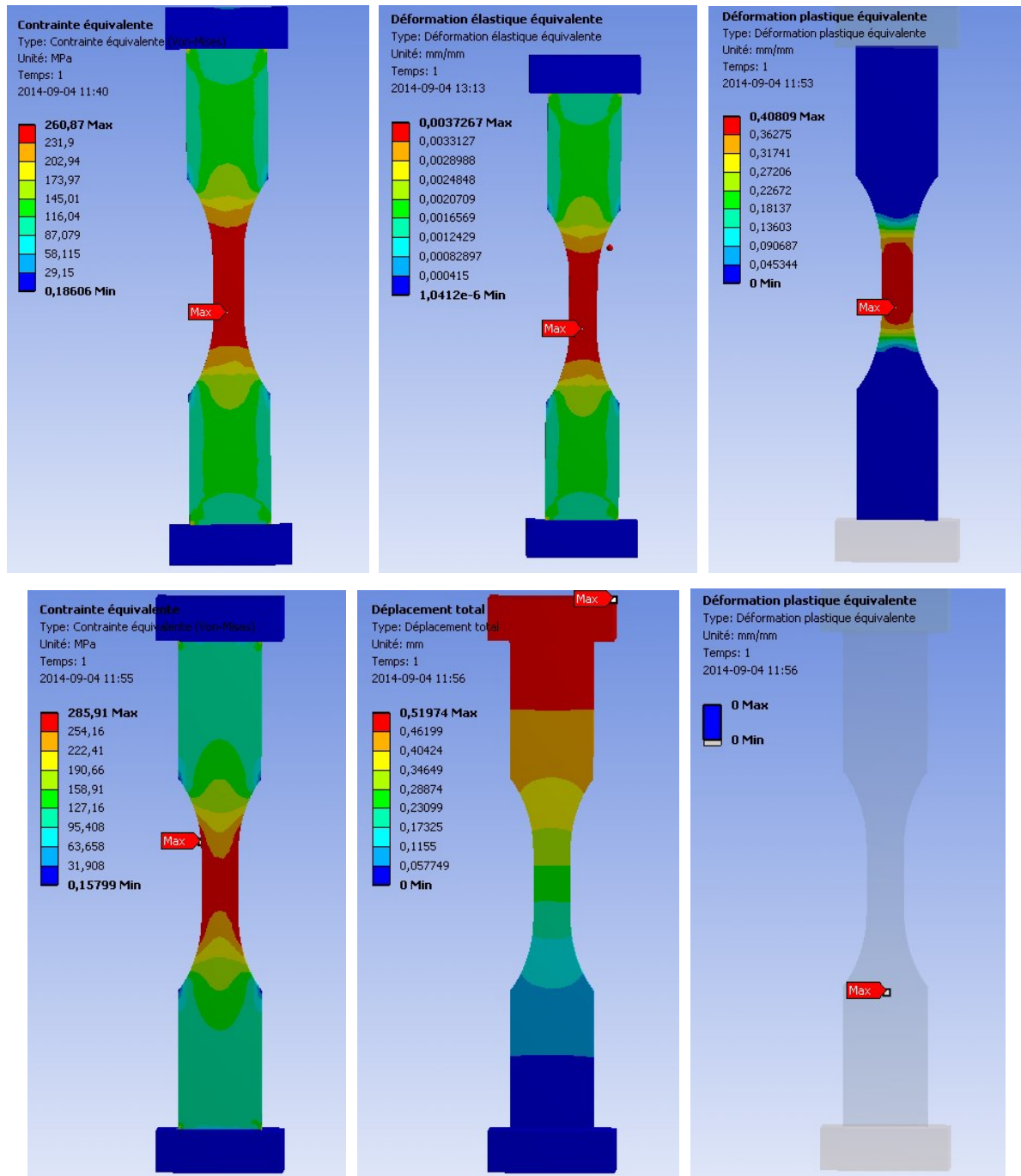


Figure 4.56: En haut, modèle avec courbe expérimentale, en bas sans. De gauche à droite, distribution de contrainte équivalente, déformation élastique, déformation plastique

On constate que la prise en compte de la courbe contrainte-déformation réelle permet d'obtenir une déformation plastique, ce qui correspond au cas réel. On constate aussi une diminution de la contrainte qui est expliquée par la déformation plastique. La prise en compte de la courbe réelle permet d'obtenir un modèle plus juste.

Le modèle CAO prenant en compte la géométrie des cordons de soudure est monté sur le gabarit utilisé pour tester le joint (figure 4.57). La validation de ce modèle numérique nécessite la comparaison des résultats à ceux obtenues via un essai expérimental. Pour réaliser cette comparaison, le modèle fin est placé sur le gabarit et est soumis au cas de chargement employé dans le cas expérimental (présenté dans les sections précédentes). Malheureusement le joint en aluminium n'a pu être testé sur le gabarit (section 4.4.2), il n'existe donc pas de valeur de référence.

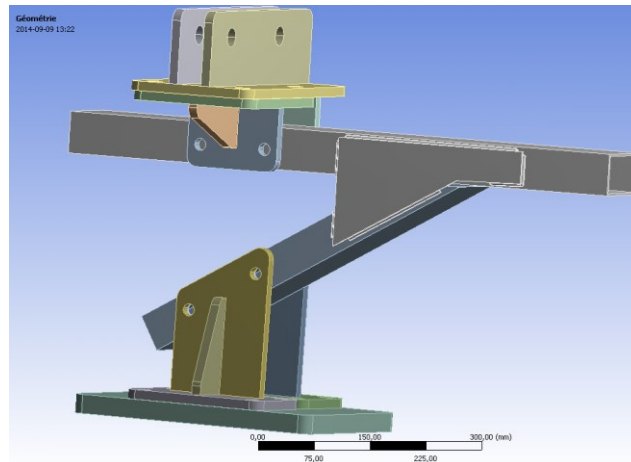


Figure 4.57: Modèle avec cordon de soudure monté sur le gabarit

Les essais de dureté réalisés au cours du projet ont permis de déterminer l'étendue de la ZAT. Ces résultats sont utilisés dans le post-traitement et la valeur de contrainte dans la ZAT ne doit pas dépasser la résistance mécanique définie par les essais sur les éprouvettes soudées.

On observera ainsi la distribution de contraintes au niveau d'une zone géométrique simple, uniquement le cordon de soudure (figure 4.58), et une géométrie plus complexe c'est-à-dire le cordon de soudure et une géométrie présentant une concentration de contrainte. La deuxième géométrie étudiée est la zone où sont apparues les fissures lors de l'essai expérimental.

Dans un premier temps on étudiera le cas de la géométrie simple ; on s'intéressera uniquement au chargement de flexion, la méthodologie est équivalente pour un chargement en torsion. On observe ainsi une concentration plus élevée au niveau du pied de cordon de soudure (figure 4.59). On peut noter sur la figure 4.59 que le maillage est raffiné au niveau du cordon de soudure afin d'avoir des résultats plus précis dans cette zone.

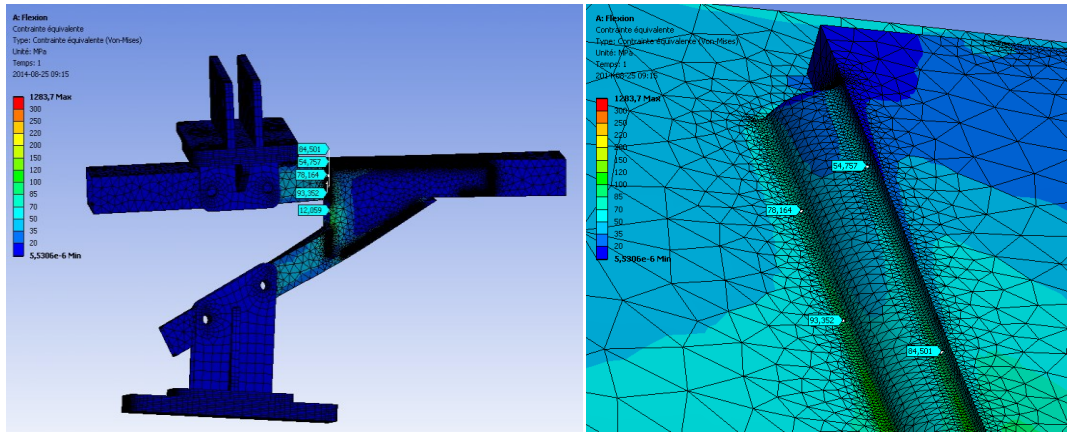


Figure 4.58: Distribution de contraintes sous un chargement de flexion, distribution de contraintes au niveau d'un cordon de soudure

L'observation du modèle 3D n'est pas suffisante pour valider la distribution ; on relèvera donc la valeur de contrainte le long d'une droite passant par le pied du cordon de soudure (figure 4.59). L'abscisse de la courbe de la figure 4.59 prend comme 0 le point 1. On observe ainsi un pic de contrainte au niveau du pied de cordon de soudure, ce qui correspond au résultat théorique (section 2.3.3).

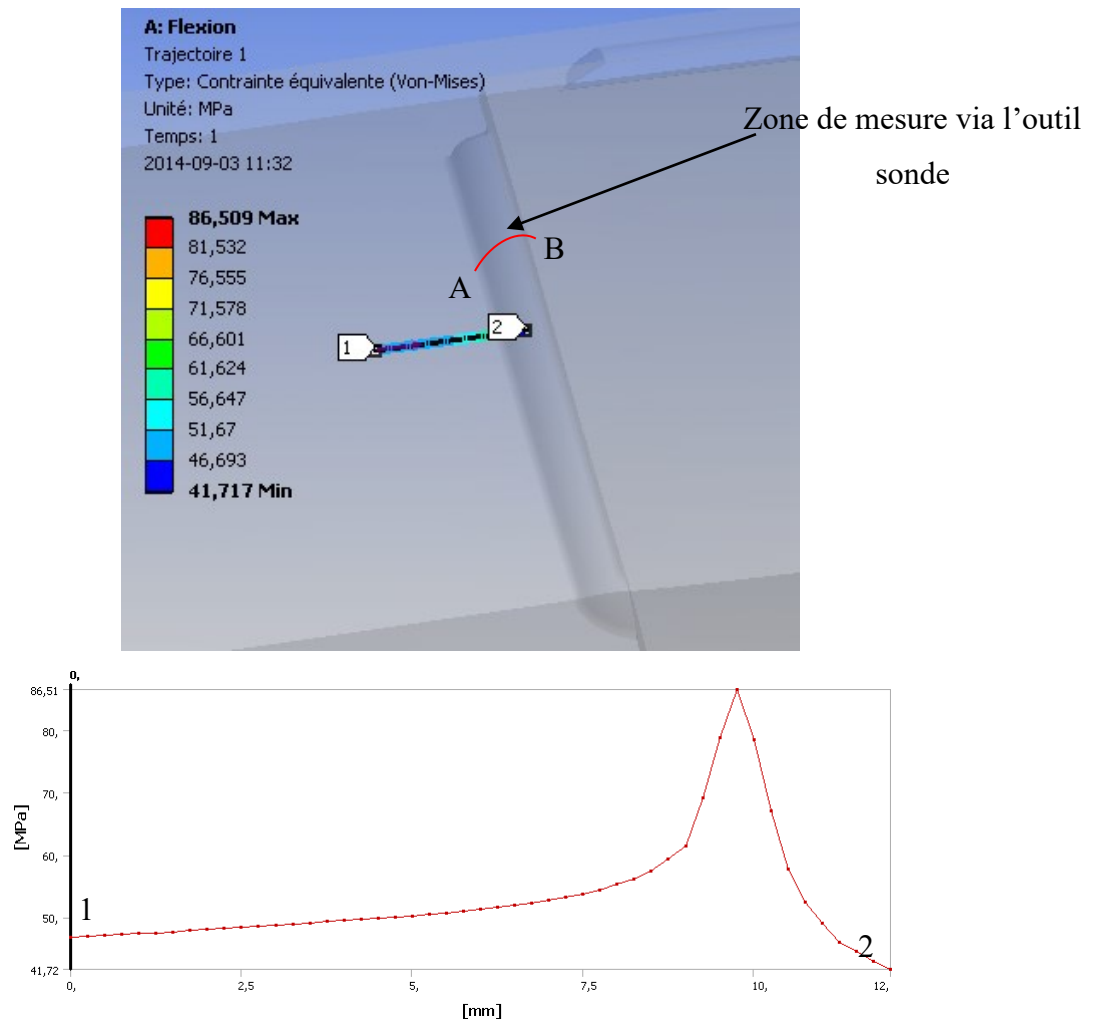


Figure 4.59: Distribution de la contrainte au niveau du pied de cordon de soudure

Les données précédentes fournissent des informations uniquement sur le pied de cordon de soudure. La méthode d'obtention des valeurs de contraintes par le logiciel Ansys ne permet pas d'obtenir une trajectoire curviligne. Pour déterminer les valeurs de contraintes en surface le long du cordon de soudure, les valeurs de contraintes ont été prises manuellement par l'outil « sonde » (figure 4.60). La zone de mesure est indiquée sur la figure 4.59. On observe un pic de contraintes au niveau des deux pieds de cordon de soudure.

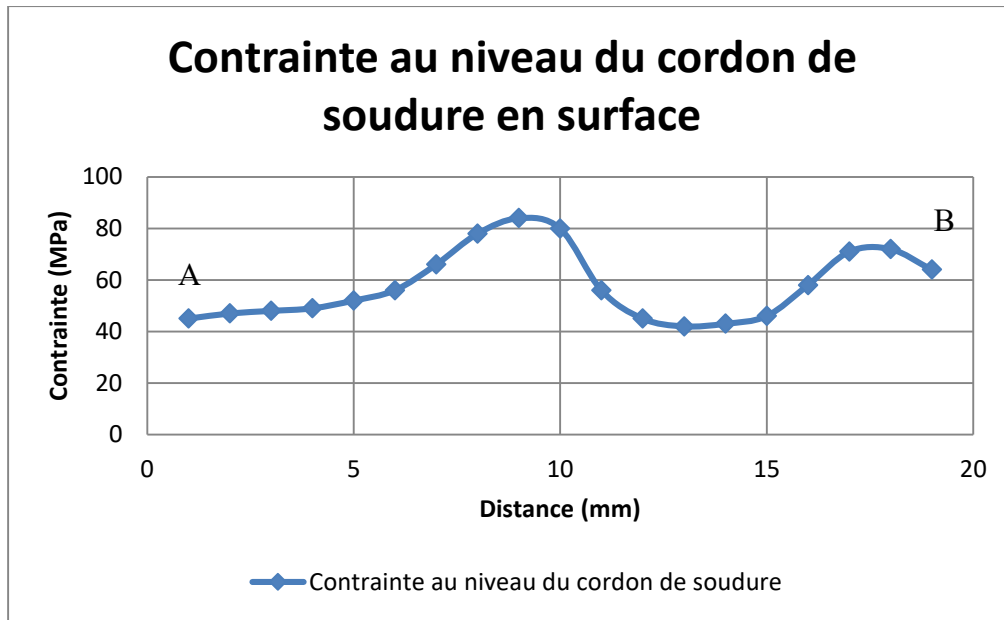


Figure 4.60: Contrainte au niveau de la surface du cordon de soudure

La seconde étude concerne la géométrie présentant une concentration de contrainte. On constate une concentration de contrainte au niveau du pied de cordon de soudure, au niveau de la zone où le cordon de soudure ne repose pas sur la pièce.

La valeur indiquée par le modèle numérique est de 1200MPa (figure 4.61). On peut certifier que cette valeur est erronée car pour cette valeur de contrainte très supérieure à la résistance mécanique du matériau, la rupture serait intervenue dès la première application de l'effort sur la pièce. Or on observe une rupture due à la fatigue. Il s'agit d'une singularité numérique dû aux arêtes vives. Une façon de s'en assurer est d'effectuer un test de convergence en affinant le maillage et en observant l'évolution de la contrainte en fonction de la qualité du maillage. La contrainte est relevée au point B pour différentes qualités de maillage, tableau 4.15. On constate qu'il n'y a pas convergence de la contrainte en ce point. C'est donc bien une singularité numérique.



Tableau 4.15 : Qualité du maillage et contrainte De Von-Mises au point B

Maillage	Nb éléments	nb nœuds	contrainte au point B (MPa)
M0	930717	588834	3485
M1	356169	227867	1287
M2	302365	198541	1041
M3	241036	145236	912
M4	195654	115450	803
M5	184562	110542	756
M6	154056	105120	640

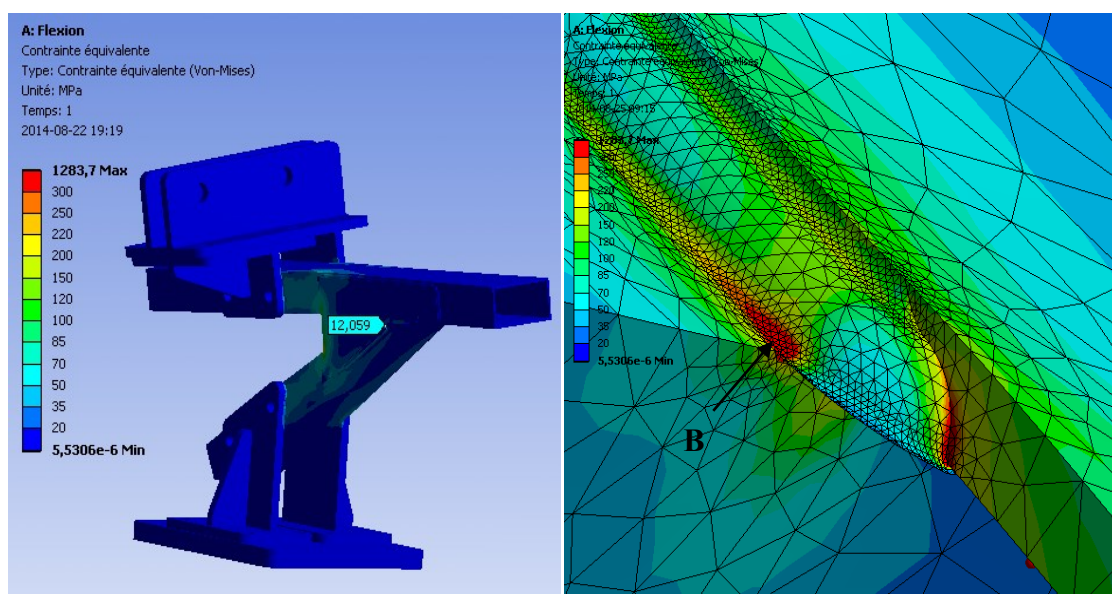


Figure 4.61: Distribution de contraintes sous un chargement de flexion à gauche, distribution de contrainte au niveau de la zone de rupture à droite

**Conclusion :**

Le modèle numérique modélisant le cordon de soudure permet d'obtenir correctement la distribution de contraintes au niveau du cordon de soudure respectant ainsi la distribution théorique. Cependant, sans résultats expérimentaux pour comparer les valeurs de contraintes au niveau du pied de cordon de soudure, il n'est pas possible de valider complètement le modèle numérique.

L'objectif du développement d'un modèle numérique est de limiter les essais expérimentaux coûteux en temps et en argent. Les différentes itérations et modifications géométriques sont réalisées via le modèle numérique au lieu d'essais expérimentaux. Il faut donc développer un modèle numérique prédictif, c'est-à-dire un modèle fournissant la bonne distribution de contraintes et la bonne valeur de contrainte. Cette section a permis de valider la distribution de contraintes ; il reste néanmoins à valider l'exactitude des valeurs de contraintes. Cette dernière étape nécessite la réalisation d'essais expérimentaux. On constate qu'au niveau d'une géométrie plus complexe le modèle numérique n'est pas capable de fournir des résultats pertinents. Les essais expérimentaux sont indispensables pour valider la géométrie finale tant qu'un modèle numérique ne sera pas capable de prédire en tout point les contraintes.

## CHAPITRE 5. Conclusion

### 5.1 Travaux réalisés et bilan de la maîtrise

La première partie de ce document a consisté à présenter les problématiques et les raisons pour lesquelles il a été décidé de concevoir un châssis en aluminium et d'étudier les zones d'assemblages. L'objectif principal de la maîtrise était d'analyser le comportement en fatigue d'un joint assemblé.

La seconde partie de ce document présente les différentes méthodologies mises en place pour répondre à ce problème. Deux méthodologies ont été développées, une première méthodologie présentant le schéma général d'étude d'un joint assemblé reprenant les méthodologies développées par C. Iorga et Y. Mogenot, adaptées au cas particulier des zones assemblées. Cette méthodologie présente les différentes étapes d'étude, du recensement des procédés au choix final du joint. Cette première méthodologie reste très générale tandis que la seconde méthodologie développée présente plutôt le plan d'action pour l'étude précise des caractéristiques mécaniques d'un assemblage.

Dans la troisième partie de cette maîtrise, la méthodologie de détermination des caractéristiques a été appliquée au châssis du Roadster. Deux séries d'essais ont été programmées ; une première série d'essais permettant la caractérisation du métal et une seconde série d'essais sur les joints pour valider leur géométrie. La première série d'essais a été réalisée sur des éprouvettes afin de déterminer les caractéristiques mécaniques du métal sain et du métal en présence d'un cordon de soudure. Ces essais ont permis de déterminer l'étendue de la ZAT et les caractéristiques mécaniques principales,  $R_e$ ,  $R_m$ ,  $E$  et  $A\%$ . La seconde série d'essais a nécessité la conception d'un gabarit et le développement d'une méthodologie de détermination des efforts à appliquer. Cette série d'essais a permis de valider le gabarit pour le joint arrière et fournir des données

pour évaluer le modèle numérique. Le gabarit a ensuite été utilisé pour la validation du joint en aluminium. Cet essai en fatigue a permis de valider le procédé d'assemblage utilisé.

Un modèle d'analyse par éléments finis a été développé pour étudier les performances du joint testé. Deux types de modélisations ont été employés ; une modélisation simple et une modélisation plus complexe modélisant les cordons de soudure. La comparaison des résultats expérimentaux avec les modèles numériques a permis de valider la distribution de contraintes fournie par le modèle numérique. La première partie d'un modèle prédictif est validée mais il reste à valider les valeurs fournies par le modèle numérique. En effet un deuxième essai instrumentalisé avec des jauges de déformation selon la méthode dit hot spot était programmé. Cet essai avait pour objectif de fournir les contraintes expérimentales afin de les comparer à celles du modèle numérique développé. Cependant le dernier essai sur le banc n'a pu être réalisé par manque de temps. L'objectif de valider le modèle numérique en tant que modèle prédictif n'a pu être rempli.

## 5.2 Perspectives et travaux futurs

A partir des travaux effectués il est possible de définir des axes de développement.

- Les essais réalisés dans ce document ont permis de valider le choix du procédé et de valider en fatigue la tenue mécanique d'un joint sollicité de ce joint. Maintenant que le procédé est choisi, il est nécessaire de valider la tenue en fatigue du châssis en entier. Le châssis doit être testé sur un banc d'essai reproduisant le chargement réel soumis au cycle présenté dans ce document.
- Après la validation du châssis sur le banc d'essai, des essais sur route seront nécessaires afin de valider la rigidité ressentie. Seule l'utilisation du véhicule par un pilote permettra d'évaluer la tenue de route du véhicule. Le comportement du véhicule dépendant de la rigidité et étant subjectif au conducteur, il serait intéressant d'avoir l'avis de plusieurs pilotes.
- Le coté prédictif du modèle numérique n'a pas été validé, il reste à valider les valeurs de contraintes fournies par le modèle numérique. La réalisation de l'essai sur le joint

---

instrumentalisé en suivant la méthode hot spot permettrait de fournir des valeurs expérimentales à comparer aux valeurs fournies par le modèle numérique.

## LISTE DES RÉFÉRENCES

1. **Mogenot, Y. (2013).** *Stratégie d'optimisation des procédés d'assemblage et de fabrication dans le processus de réduction de poids du châssis d'un véhicule roadster*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada, 110 p.
2. **Lavergne, J. (2003).** *Règlement sur les émissions des véhicules routiers et de leurs moteurs (SOR/2003-2)*. Loi canadienne sur la protection de l'environnement.
3. **Burgess, S. C. et Choi, J. M. J. (2003).** A parametric study of the energy demands of car transportation: A case study of two competing commuter routes in the uk. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Vol. 8, numéro 1, p. 21-36.
4. **Zervas, E. et Lazarou, C. (2008).** Influence of european passenger cars weight to exhaust co2 emissions. *Energy Policy*. volume 36, numéro 1, p. 248-257.
5. **Jambor, A et Beyer, M. (1997).** New cars-new materials. *Materials and design*. volume 18, numéro 4-6, p. 203-209.
6. **Brechet, Y, Ashby, M., Dupeux, M. et Louchet, F. (1997).** Choix et usage de matériaux. *Techniques de l'ingénieur*.
7. **Chatain, M. (1999).** Conception d'un objet. *Techniques de l'ingénieur*.
8. **Veux, G. (2005).** *Développement d'une méthodologie d'analyse par éléments finis pour la conception en fatigue de structure soudées*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada.
9. **Daigle, G. (1982).** *Présentation sur le châssis*. (Rapport d'étude spécialisé). Bombardier division produits récréatifs), Valcourt, Canada.
10. **Boivin, Yannick (1998).** *Approche de conception et d'analyse de durabilité d'un châssis de motoneige*. Essai de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada, 150p.

11. **Kim H.J, Keoleian G.A et Skerlos S.J (2010).** Economic Assesment of Greenhouse Gas Emissions Reduction by Vehicle Lightweighting Using Aluminium an High-Strenght Steel. *Journal of Industrial Ecology*. p. 64-80.
12. **l'Eglise, T.D. (2001).** *A multicriteria decision-aid system for joining process selection*. IEEE International Symposium, Assembly and Task Planning, IEEE, Fukuoka, p. 324-329.
13. **Audi France (2013).** *Audi A2 - Carrosserie. Conception et fonctionnement*. (Programme autodactique 239). Audi, France, 58p.
14. **Association de l'aluminium du Canada (2012).** *Comprendre l'aluminium et ses applications*. [En ligne] <http://www.ledialoguesurlaluminium.com/laluminium/ses-utilisations/transports> (page consultée le 13 juin 2013).
15. **Kochan, A. (1996).** *Lotus: Aluminium extrusions and adhesives*. volume 16, numéro 4, p. 19-21. p. 16.
16. **Develey, R. (1986).** Traitement thermique des alliages d'aluminium. *Technique de l'ingénieur*.
17. **Barnes, T. E. (2000).** Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles. *Journal of materials processing technology*. Volume 1, numéro 99, p.211.
18. **Fourmentraux, T (1999).** *Contribution à la caractérisation numérique et expérimentale d'assemblage soudés par points soumis à des sollicitations quasi-statiques*. Thèse de Doctorat, université de Valenciennes, Valenciennes, France, 318p.
19. **Dowlatshahi, S. (1994).** A comparison of approaches to concurrent engineering. *The international Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Volume 9, numéro 2, p. 106-113.
20. **Fruiter, L. (2012).** Construction métalliques. Moyens d'assemblage. *Techniques de l'ingénieur*.
21. **Fayolle, S. (2008).** *Etude de la modélisation de la pose et de la tenue mécanique des assemblages par déformation plastique*. Thèse de doctorat, Mines ParisTech, Paris, France.
22. **Bruhwiller, E., Bez, R. et Hirt, M. (1985).** Résistance à la fatigue des constructions rivetées. *Ingénieurs et architectes suisses*. volume1, numéro 1-2.
23. **AFNOR (1991).** *Norme européenne, norme française des éléments de fixation*. (Caractéristiques mécaniques des éléments de fixation, NF EN 20898-1 et NF EN 20898-2). AFNOR, FRANCE.

24. **Massol, J. (1992).** Etude des assemblages boulonnées à chargement faiblement excentré soumis à des sollicitations de fatigue. Thèse de doctorat, INSA, Toulouse, France.
25. **Develay, R. (2000).** Propriétés technologiques de l'aluminium et ses alliages corroyés. *technique de l'ingénieur*. Vol. M493, 1.
26. **Iorga, C. (2012).** *Developpement de méthodologie de validation en fatigue d'un chassis d'un roadster*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada.
27. **Pronovost, Christian.** *Développement d'approche analytique dédiées pour le calcul préliminaire de chassis de véhicules récréatifs*. 2003.
28. **scenari (juillet 2015).** *Méthodes normalisées et codes de dimensionnement contre le risque de rupture par fatigue des joints soudés*. [En ligne] [http://campus-douai.gemtech.fr/file.php/266/fatigue20101001/co/Cours6\\_3\\_4.html](http://campus-douai.gemtech.fr/file.php/266/fatigue20101001/co/Cours6_3_4.html) (page consultée le 20 juillet 2015).
29. **Drazétic, P. (2003).** Outils de conception au choc: Un panorama. *Mécanique et Industries*. Volume 4, numéro 1, p. 51-61.
30. **Langrand, B. (2005).** Comportement et modélisation des assemblages ponctuels. *Techniques de l'ingénieur*.
31. **Mouro, P.G. (2000).** Dynamic tensile testing of sheet metal. *Journal de physique*. volume 10, numéro 9, p. 149-154. Vol. 4.
32. **Haugou, G. (2003).** *Moyens d'essais de caractérisation de lois de comportement matérielles en dynamique moyennes vitesses*. Thèse de doctorat, université de Valenciennes, Valenciennes, France, p. 500.
33. **Bristiel, P. (2005).** Simulation numérique du soudage Application au cas industriel d'une traverse arrière automobile. *Techniques de l'ingénieur*.
34. **Réglementations, Association Francaise des Normes (2014).** AFNOR A03-400, A03-403, A03-405.
35. **Dorlot J-M, Bailon J-P et Masounave J. (1986).** *Des matériaux*. École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada, 543p.
36. **Hertzberg, Richard W. (1996).** *Deformation and fracture of Engineering Materials*. John Wiley and Sons, New York, états-unis, p. 786.



- 
37. **Arnoux, Eric.** *Alumatter (janvier 2010)*. [En ligne]  
<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/fre/default.asp?catid=49&pageid=2144416802>.  
(Page consultée le 12 juin 2014).
38. **Aalco (2015).** *Aluminium Alloy - Commercial Alloy - 6061 - T6 Extrusions*.  
[http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6061-T6-Extrusions\\_145.ashx](http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6061-T6-Extrusions_145.ashx) (page  
consultée le 30 juillet 2015).
39. **ZALT, A. (2012).** Endommagement par fatigue et prédiction de la durée de vie des joints soudés de type caisson. thèse de doctorat, université de Lorraine, Nancy, France. 115 p.
40. **Temmar, M. , Hadji, M. et Sellam, M. (2011).** Caractérisation des assemblages soudés par le procédé de soudage des alliages d'aluminium 7075T6. *U.P.B. Sci. Bull.* volume 73, numéro 1.
41. **Webber, Don. (1978).** Evaluation of possible Improvement Methods for Aluminium-Zinc Magnesium Fillet-Welded Details, volume STP 648. American Society for Testing, p. 73-88.
42. **Hobbacher, A et autres (1996).** *Fatigue design of welded joint and components, volume XIII-1539-96/XV-845-96*. Abington Publishing, p. 127. p. p127.
43. **Maltais, P. (2008).** *Développement d'une méthodologie de prédiction de la durée de vie en fatigue de structures tubulaires soudées en aluminium*. Essai de maîtrise, UQUAM, Montréal, Quebec, Canada, 190 p.
44. **CETIM (1989).** *Mecanosoudage Conception*. Jouve, Paris, France, 130p.
45. **Michel, A. (2002).** Pièces mécaniques soudées Conception des assemblages. *techniques de l'ingénieur*.
46. **Weman, K. (2011).** *Aide-mémoire Procédés de soudage*. DUNOD.